

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Mikulić

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Ivan Mikulić

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof.dr.sc Zoranu Kožuhu na potpori i povjerenju tijekom izrade ovog rada. Posebno se zahvaljujem znanstvenom novaku mag. ing.mech. Jozefu Tuniću koji mi je svojim praktičnim savjetima mnogo pomogao pri pisanju ovog rada.

Također se zahvaljujem svim djelatnicima Katedre za zavarene konstrukcije koji su mi pomogli pri izradi ovog rada, posebno u eksperimentalnom dijelu.

Ivan Mikulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
1. Uvod	1
2. Podvodno zavarivanje.....	3
2.1. Suho podvodno zavarivanje	3
2.1.1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori	4
2.1.2. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori	6
2.1.3. Atmosfersko podvodno zavarivanje.....	7
2.1.4. Lokalno suho podvodno zavarivanje	8
2.2. Mokro podvodno zavarivanje	9
2.2.1. Povijesni razvoj postupka	9
2.2.2. Osnovne karakteristike mokrog podvodnog zavarivanja.....	10
2.2.3. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja	11
2.2.4. Polaritet pri mokrom podvodnom zavarivanju	12
2.2.5. Plinski mjehur	14
2.2.6. Osnovne tehnike rada.....	15
2.2.6.1. Tehnika povlačenja (Drag technique).....	15
2.2.6.2. Tehnika njihanja (Oscillation technique).....	16
2.2.6.3. "Korak-unatrag" tehnika (Step-back technique).....	17
2.2.7. Dodatni materijali	18
2.2.8. Problemi pri mokrom podvodnom zavarivanju	23
2.2.9. Utjecaj parametara na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju.....	25
2.2.10. Oprema pri mokrom podvodnom zavarivanju	27
2.3. Zavarljivost	29
2.4. Primjena mokrog podvodnog zavarivanja	31
2.5. Klasifikacija podvodnih zavara prema AWS D3.6.....	33
3. Razvoj i primjena čelika visoke čvrstoće API 5L X80.....	34
4. Eksperimentalni dio	37
4.1. Opis eksperimenta.....	37
4.2. Osnovni materijali.....	39
4.3. Parametri navarivanja u eksperimentu	40
4.4. Mjerenje tvrdoće	46
4.5. Mikroanaliza	Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.
5. Zaključak	62
6. Literatura.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1.	Naftna platforma [1]	1
Slika 2.	Prikaz pozicija off-shore postrojenja u Meksičkom zaljevu 2006. [1].....	1
Slika 3.	Mokro podvodno zavarivanje [5]	2
Slika 4.	Hiperbaričko zavarivanje [8]	5
Slika 5.	Zavarivanje u mini-komori [9]	6
Slika 6.	Izvedbe suhih kutija [6]	8
Slika 7.	Prikaz REL zavarivanja u suhoj i mokroj okolini [11]	11
Slika 8.	Negativan polartiet [11].....	13
Slika 9.	Prikaz procesa mokrog zavarivanja [6]	14
Slika 10.	Tehnika povlačenja [11]	15
Slika 11.	Kut nagiba elektrode kod kutnog zavara [11]	15
Slika 12.	Tehnika njihanja [11]	16
Slika 13.	"Korak unatrag" tehnika [11]	17
Slika 14.	Navy 1 i Navy 2 elektrode [16]	21
Slika 15.	Presjek elektroda Navy 1 i Navy 2 nakon procesa zavarivanja [16]	21
Slika 16.	Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima (gornji dio dijagrama) i mokrom podvodnom zavarivanju (donji dio dijagrama) [13].....	23
Slika 17.	Temperirani sloj zavarenog spoja [15].....	24
Slika 18.	Karakteristične greške u zavarenom spoju nastalom mokrim podvodnim zavarivanjem [12].....	25
Slika 19.	Utjecaj napona zavarivanja na rastvorivost vodika [15]	26
Slika 20.	Utjecaj jačine struje na rastvorivost vodika [15]	26
Slika 21.	Strmopadajuća karakteristika struje [11].....	28
Slika 22.	Reparatura nosača platforme [17]	31
Slika 23.	Zavarivanje prirubnice cijevi [17].....	32
Slika 24.	Zavarivanje propelera broda [17]	32
Slika 25.	Izmjena žrtvovanih anoda [17].....	32
Slika 26.	Razvoj čelika visoke čvrstoće [13].....	34
Slika 27.	Mehanizmi očvršćivanja za čelike X60,X70 i X80 [13]	35
Slika 28.	Tipične mikrostrukture čelika X60,X70 i X80 [13]	36
Slika 29.	Bazen u kojem se odvijao pokus	37
Slika 30.	Uzorci napravljeni od API 5L X80 čelika	38
Slika 31.	Prikaz Thyssen Nautica i Lastek elektrode	38
Slika 32.	Izvor struje za zavarivanje te njegove karakteristike	39
Slika 33.	Dijagram za određivanje jačine struje	41
Slika 34.	Tvrdomjer	46
Slika 35.	Prikaz pozicija mjerenja tvrdoće	47
Slika 36.	Dijagram izmjerenih tvrdoća 1,2,3 i 4. uzorka (API 5L X80 čelik, Thyssen Nautica elektroda)	48
Slika 37.	Dijagram izmjerenih tvrdoća 5,6,7 i 8. uzorka (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda).....	49
Slika 38.	Dijagram izmjerenih tvrdoća 9 ,10, 11 i 12. uzorka (S235 čelik, Thyssen Naustica elektroda).....	50
Slika 39.	Dijagram izmjerenih tvrdoća 13, 14, 15 i 16. uzorka (S235 čelik, Lastek elektroda).....	51

Slika 40.	Usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća pri navarivanju Thyseen Nautica elektrodom.....	52
Slika 41.	Usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća pri navarivanju Lastek elektrodom	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav API 5L X80 čelika [18]	39
Tablica 2. Kemijski sastav S235 čelika prema EN 10025 : 2004 [19].....	39
Tablica 3. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda)	42
Tablica 4. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)	43
Tablica 5. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (S235 čelika Thyseen Nautica elektroda)	44
Tablica 6. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (S235 čelik, Lastek elektroda)	45
Tablica 7. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju X80 čelika Thyseen Nautica elektrodom	48
Tablica 8. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju X80 čelika Lastek elektrodom.....	49
Tablica 9. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju S235 čelika Thyseen Nautica elektrodom	50
Tablica 10. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju S235 čelika Thyseen Nautica elektrodom	51
Tabela 11. Prikaz mikrostrukture uzorka 1 (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda) .	54
Tabela 12. Prikaz mikrostrukture uzorka 3 (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda) .	56
Tablica 13. Prikaz mikrostrukture uzorka 5 (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)	58
Tablica 14. Prikaz mikrostrukture uzorka 6 (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
t	s	vrijeme
v_z	cm/min	brzina zavarivanja
I	A	jačina struje
U	V	napon struje
q	kJ/cm	unos topline
T	°C	temperatura
CE	%	ekvivalent ugljika prema IIW
P_{cm}	%	ekvivalent ugljika prema Ittso-Bessyou
η		stupanj iskorištenja postupka zavarivanja

SAŽETAK

Cilj ovog rada bilo je ispitati mogućnosti mokrog podvodnog zavarivanja čelika za cjevovode API 5L X80.

U uvodnom dijelu navedene su sve moderne tehnike mokrog i suhog podvodnog zavarivanja koje se danas koriste u off-shore industriji. Detaljno je obrađena fizika procesa, problematika, i svi tehnički aspekti tehnike mokrog podvodnog REL zavarivanja. Jedno poglavlje posebno je posvećeno razvoju čelika povišene čvrstoće te njihovoj primjeni u praksi, s naglaskom na off-shore industriju.

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Iz osnovnog materijala API 5L X80 izrađene su epruvete na kojima se izvodilo navarivanje. Kao dodatni materijal za navarivanje koristile su se dvije vrste elektroda za podvodno zavarivanje, Thyssen Nautica Ø3,2 mm i Lastek Ø4 mm elektroda. Na dobivenim navarenim spojevima ispitana je tvrdoća te je izvršena analiza mikrostrukture, kako bi se utvrdila kvaliteta dobivenih navarenih spojeva, a time i primjenjivost mokrog podvodnog zavarivanja za API 5L X80 čelik.

Isti postupak ponovljen je na konstrukcijskom čeliku S235 u cilju usporedbe dobivenih rezultata sa rezultatima API 5L X80 čelika.

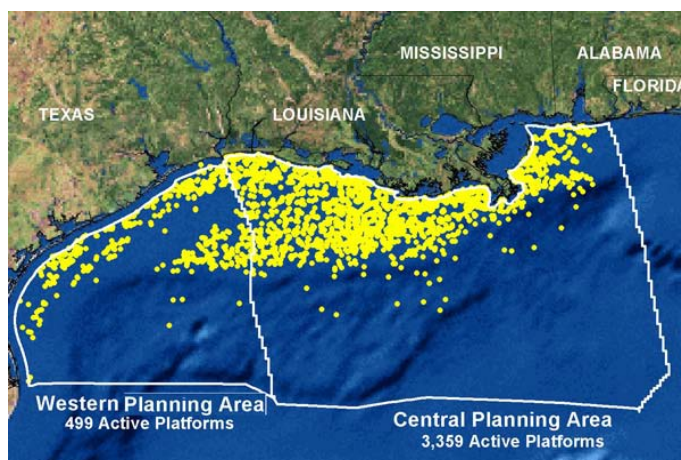
1. Uvod

Kako se potraga za novim izvorima nafte i zemnog plina proširila na mora i oceane, naftne platforme [Slika 1] i druge off-shore konstrukcije za proizvodnju i transport energetskih sirovina postale su uobičajen prizor na morskoj površini i dnu.



Slika 1. Naftna platforma [1]

Danas se najviše off-shore postrojenja za crpljenje, proizvodnju i transport nafte i zemnog plina nalazi na površini Meksičkog zaljeva, Indijskog oceana, izvan granica kontinentalnog pojasa Brazila i Zapadne Afrike te u dubokim, hladnim vodama Sjevernoga mora. Tijekom 2006. godine samo u Meksičkom zaljevu postojalo je oko 4000 platformi i drugih plutajućih postrojenja za proizvodnju nafte i zemnog plina [Slika 2]. [2]



Slika 2. Prikaz pozicija off-shore postrojenja u Meksičkom zaljevu 2006. [1]

Troškovi rada i održavanja off-shore konstrukcija su visoki te se stoga konstantno istražuju nove tehnologije i postupci kojima će se povećati produktivnost, a pritom smanjiti cijena reparature i održavanja. Kako površina svjetskog mora pokriva oko 71% površine Zemlje, more je i velika prometnica te se na njemu danas odvija oko 4/5 svjetskog robnog prometa. Sve platforme, brodovi, cjevovodi i druge off-shore konstrukcije podložne su nastajanju oštećenja uslijed zamora materijala, korozije, teških vremenskih prilika i sudara sa drugim plovilima. Često smo svjedoci nastajanju raznih ekoloških katastrofa i gubitaka ljudskih života uslijed lošeg rukovanja postrojenjima i neprimjerenog održavanja. Važnost tehnologija podvodnog zavarivanja i ispitivanja ističe se u održavanju i reparaturi brojnih off-shore postrojenja i pomorskih objekata. Kako su pomorski objekti danas rasprostranjeni na dubinama od nekoliko 10-taka metara sve do dubina od 1000 m i dublje, razvijene su različite tehnike podvodnog zavarivanja. Kod velikih dubina i visokih zahtjeva kvalitete zavarenih spojeva koriste se suhe tehnike zavarivanja, a za dubine do približno 70 m i manje zahtjevnih spojeva, mokre tehnike zavarivanja. Za uspješno izvođenje mokrog zavarivanja koje se odvija u nepraktičnom i opasnom ambijentu, pod vodom, nužno je dobro poznavati sve elemente koji u njemu sudjeluju. [3] Tih elemenata ima mnogo, a najviše pažnje posvećuje se čovjeku te njegovoj sigurnosti. Mokro podvodno zavarivanje, zajedno s ispitivanjem zadobili su povjerenje i profesionalno su prihvaćeni. Za postizanje visoke kvalitete zavarenih spojeva dobivenih ovom tehnikom zaslužan je razvoj novih tehnologija zavarivanja, izvora struje, ronilačke opreme, dodatnog materijala kao i bitna poboljšanja u osposobljavanju zavarivača. [4] Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja danas je jedna od glavnih tehnika reparaturnih i remontnih radova [Slika 3].



Slika 3. Mokro podvodno zavarivanje [5]

2. Podvodno zavarivanje

2.1. Suho podvodno zavarivanje

Tehnike podvodnog zavarivanja dijele se u dvije osnovne skupine prema atmosferi u kojoj se zavarivanje odvija. Kod suhih tehnika, zavarivanje se odvija ili unutar raznih izvedbi podvodnih kutija za zavarivanje ili unutar podvodnih komora pri atmosferskom ili hiperbaričkom tlaku. Vrsta plinovite atmosfere i ambijentalni tlak važni su čimbenici koji utječu na proces zavarivanja te na kvalitetu dobivenih zavarenih spojeva. Komprimirani zrak i mješavine za disanje na bazi dušika imaju u pravilu negativan utjecaj na strukturu, svojstva i kvalitetu zavarenih spojeva. Najčešće se kao plinovita atmosfera za disanje koriste smjese na bazi kisika i helija, a kao zaštitni plin koristi se argon. Koliki udio će pojedini plin imati u smjesi ovisi kako o dubini mjesta zavarivanja tako i o tome dali se radi o plinskoj mješavini za disanje, zaštitnoj plinskoj atmosferi pri zavarivanju ili okolnoj atmosferi u komori. [6] Porastom dubine mjesta zavarivanja raste i udio helija u plinskoj atmosferi. Kvaliteta zavarenih spojeva dobivenih suhim tehnikama zavarivanja je dobra i ponekad istovjetna kvaliteti spojeva zavarenih na kopnu jer je moguće postići A i O klase zavora prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6. Ovako visoku kvalitetu zavora postiže se ne samo zahvaljujući okolnim uvjetima (zaštitna atmosfera, hlađenje zavora na zraku), već i zbog mogućnosti predgrijavanja i naknadne toplinske obrade nakon zavarivanja. Također, kod suhog zavarivanja postoje odlični uvjeti za pripremu spoja prije zavarivanja te ako je potrebno lako se izvodi naknadno brušenje. Cijene suhih podvodnih tehnika zavarivanja višestruko su veće od cijena zavarenih spojeva ostvarenih mokrim zavarivanjem zbog angažiranja velike količine prateće nadvodne i podvodne tehničke podrške za dubinska ronjenja. Na primjer, za zavarivanje K-nosača pri izgradnji platforme na moru korištenjem tehnike mokrog zavarivanja postigli bi se mnogo manji troškovi nego korištenjem suhih tehnika zavarivanja. [2] No to nije uvijek moguće, jer su zahtjevi za kvalitetu zavarenih spojeva nekad takvi da su ostvarivi jedino suhim zavarivanjem. Drugi nedostatak jest nefleksibilnost postupka jer da bi se montirala komora potreban je jednostavan pristup mjestu zavarivanja, što kod nosećih konstrukcija platformi nije uvijek slučaj. Stoga se tehnike suhog zavarivanja koje uključuju komore i mini komore primjenjuju prvenstveno za zavarivanje podvodnih cjevovoda. Za rad na platformama češće se koriste tehnike suhog zavarivanja koje koriste kutije kao prostor u kojem se zavarivanje odvija. Pri suhom zavarivanju primjenjuju se jednake tehnike rada kao u tvorničkim radionicama, a najčešće se zavaruje REL, TIG, MIG/MAG i FCAW postupcima

zavarivanja zavisno o dubini, osnovnom materijalu, debljini osnovnog materijala, itd.. Znatan broj istraživanja posvećen je objašnjavanju utjecaja povišenog tlaka na ponašanje električnog luka te optimalnom namještanju parametara zavarivanja. [4]

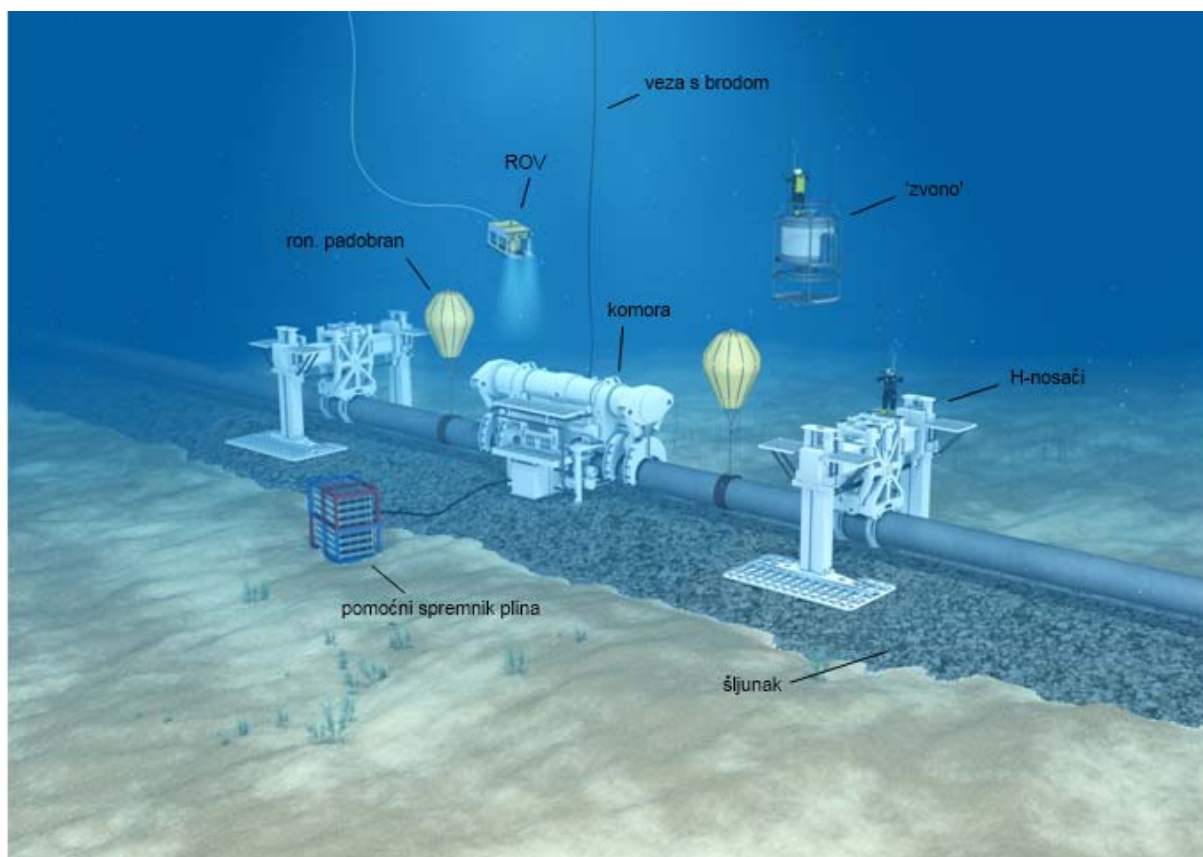
Prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6 tehnike suhog podvodnog zavarivanja dijele se u 4 osnovne varijante:

- a) Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori
- b) Zavarivanje u suhoj zavarivačkoj mini-komori
- c) Atmosfersko podvodno zavarivanje
- d) Lokalno suho podvodno zavarivanje

2.1.1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori

Za hiperbarička zavarivanja na dubinama do 180 m (prema nekim izvorima do 250 m) danas se koristi mehanizirani orbitalni TIG postupak zavarivanja hladnom žicom, kojim se upravlja sa ronilačkog broda. U tipičnom podvodnom zahvatu područje oko cjevovoda mora prvo biti iskopano i očišćeno kao dio pripreme za podizanje. Dva velika H nosača, svaki težine 70 tona sa kapacitetom podizanja od 120 tona koriste se za manipulaciju cjevovoda [Slika 4.]. Kombinirani alat presijeca oštećeni dio cjevovoda vodenim mlazom pod visokim tlakom. Mlaz vode visokog tlaka koristi se za odstranjivanje antikorozivnog premaza na mjestu zavarivanja. Dio koji se zamjenjuje spušta se sa broda i pozicionira pomoću H nosača. Zadnje poravnavanje krajeva cijevi je gotovo kad se komora montira na mjesto gdje će se zavarivanje odvijati. Kada se komora montira, voda u njoj zamjenjuje se plinskom atmosferom. Do ove točke operacija se odvija bez intervencije ronioca. Pomoću kombiniranog alata obavlja se priprema spoja za zavarivanje. Sav rad sa alatom, uključujući postavljanje i uklanjanje glave za zavarivanje izvodi ronioc koji se nalazi unutar komore. Specificirano je pozicioniranje pripremljenih krajeva cijevi do oko 0, + 1mm zazora u korijenu i oko 0, +2mm smaknuće pod kontrolom ronioca. Postizanje ovakve tolerancije ključno je za pravilno izvođenje kvalitetnog sučeljenog spoja. Kada su krajevi cijevi u ravnini, ronioc postavlja glavu za zavarivanje, opremu za predgijavanje (elektrootporno ili induktivno) te kablove za odvođenje zaštitnog plina, tako da je sve spremno za početak zavarivanja. Od tog trenutka operateri koji se nalaze na brodu preuzimaju vođenje procesa zavarivanja. Proces se prati kamerama koje daju prednji i stražnji pregled električnog luka i taline zavara. U kontrolnoj kabini na ronilačkom brodu, tim koji se sastoji od operatera za zavarivanje te inženjera zavarivanja kontrolira proces zavarivanja.

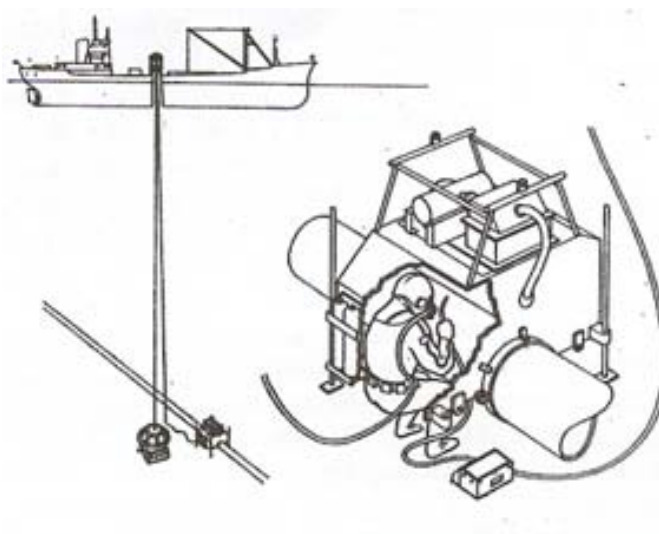
Parametri za svaki prolaz određuju se testiranjima koja su prije provedena u hiperbaričkoj testnoj komori na kopnu. Unaprijed programirani parametri zavarivanja mogu se tijekom procesa mijenjati unutar određenog polja tolerancije. Zavarivanje se odvija u zaštitnoj plinskoj atmosferi koja se sastoji od kisika i helija, a služi i kao plin za disanje dvojici ronioca koji asistiraju tijekom zavarivanja. Korištenjem Heliox-a sprječava se narkoza ronioca na velikim dubinama koju izaziva dušik i kisik u krvi, ali i kontaminacija metala zavara dušikom što omogućava dobivanje zavarenih spojeva visoke kvalitete. [7]



Slika 4. Hiperbaričko zavarivanje [8]

2.1.2. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori

Drugi tip komore koji se koristi pri hiperbaričkom zavarivanju jest zavarivačka mini komora [Slika 5.]. Nakon postavljanja na mjesto zavarivanja, mini komora se ispunjava odgovarajućom plinskom mješavinom do te mjere da se nivo vode u komori spusti ispod nivoa spoja kojeg treba zavariti. Zbog malog prostora u komorama nije moguće imati sve alate i ostalu opremu kao u normalnim komorama. [3] Ronioci-zavarivači se ne preoblače pri ulasku u komoru već cijelo vrijeme ostaju u ronilačkom odijelu. Dok u mini komori istovremeno može raditi tek jedan zavarivač njegova zamjena nalazi se u zvonu, a treći član tima nalazi se u komori na brodu pri uvjetima ambijentalnog tlaka mjesta zavarivanja. Ronioc-zavarivač se tijekom zavarivanja nalazi djelomično u vodi s toga se zbog niskih temperatura na većim dubinama često koriste grijana odjela. Kvaliteta zavarenog spoja ovisi o stupnju vlage u atmosferi komore i mogućnosti kvalitetne pripreme spoja. Metoda zavarivanja koja se u praksi uglavnom koristi kod hiperbaričkog suhog zavarivanja u mini komorama, a izvodi je ronioc-zavarivač, je elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim plinom s taljivom elektrodom. [9]



Slika 5. Zavarivanje u mini-komori [9]

2.1.3. Atmosfersko podvodno zavarivanje

Atmosfersko podvodno zavarivanje može se izvesti na dva načina, pomoću čvrste nepropusne komore u kojoj vlada atmosferski tlak neovisno o dubini na kojoj se nalazi ili pomoću koferdama.

a) atmosfersko podvodno zavarivanje u komorama

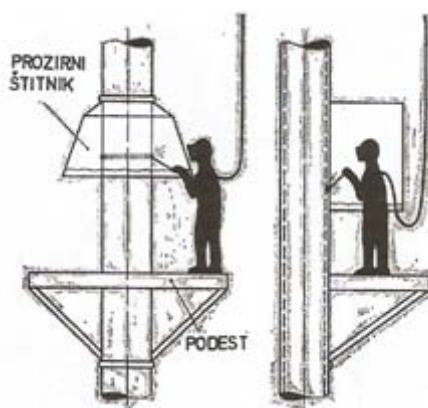
Komora za zavarivače montirana je na strani konstrukcije koju treba zavariti i u njoj vlada normalni atmosferski tlak tijekom zavarivanja. Nakon što se komora montira, voda u njoj zamjenjena je odgovarajućom plinskom atmosferom, a tlak se stabilizira na 1 atmosferu. U komori je moguće koristiti opremu i dodatni materijal kao kod zavarivanja na suhom. Nakon postavljanja komore, zavarivači se transportiraju pomoću zvona do komore te nisu izloženi povišenom tlaku. Veliki problem kod ove tehnike jest pravilno brtvljenje između komore i stijenke radnog komada. Ova izvedba suhog zavarivanja nije našla značajniju primjenu u praksi zbog visokih investicijskih troškova i vrlo složene prateće tehničke podrške. [3]

b) atmosfersko podvodno zavarivanje koferdamom

Kako bi se izoliralo mjesto zavarivanja od vode koriste se aluminijske ili čelične konstrukcije, koje su odozgo otvorene prema atmosferi. Na ovaj način nema potrebe za ronjenjem te nema utjecaja povišenog tlaka na parametre zavarivanja. Prije podvodne montaže, sloj polimerne pjene adhezijski se veže na kontaktne površine koferdama s konstrukcijom te sprječava prodor vode u koferdam tijekom zavarivanja. Nakon postavljanja i fiksiranja koferdama na konstrukciju voda koja se nalazi u njemu se ispumpava pomoću posebnih sustava ventila. Zavarivači ulaze u koferdam sa gornje (otvorene) strane. Kod zavarivanja u malim prostorima zbog nakupljanja dima nastalog izgaranjem elektrode i osnovnog metala te zaštitnih plinova uvijek postoji opasnost od eksplozije stoga je bitno ugraditi dobar ventilacijski sustav. Zavarivanje pomoću koferdama često se koristi u praksi zbog visoke kvalitete dobivenih zavara u odnosu na zavare dobivene "mokrim" postupcima zavarivanja. Kao i kod komora, ovdje se često javljaju problemi vezani uz propuštanje vode na mjestima gdje se koferdam i metalna konstrukcija spajaju te je toga nekad tijekom cijelog procesa potrebno ispumpavati vodu iz koferdama. Pri zavarivanju u koferdamu moguće je koristiti REL te MIG/MAG postupak punom i praškom punjenom žicom. [10]

2.1.4. Lokalno suho podvodno zavarivanje

Postoji više izvedbi lokalnog suhog podvodnog zavarivanja [Slika 6.], no sve se baziraju na tome da se voda odstrani sa mjesta zavarivanja i njegove neposredne blizine tlačenjem plina ili plinskih mješavina u kutije montirane oko mjesta zavara. Veličina i oblik ovih kutija ovisi o konstrukciji koja se zavaruje. U nekim izvedbama ronionoc-zavarivač tijekom zavarivanja može se nalaziti u kutiji koja je otvorena s donje strane. Pritom stoji na improviziranom nosaču. U drugim izvedbama ronionoc se nalazi u vodenoj okolini, a mala kutija od prozirnog materijala montirana je na mjesto zavarivanja. Ronionoc-zavarivač drži pištolj sa unutrašnje strane te izvana prati proces zavarivanja. Proces koji se pretežno upotrebljava je MIG, a kvaliteta zavarenih spojeva približna je onima dobivenim na kopnu. [6]



Slika 6. Izvedbe suhih kutija [6]

2.2. Mokro podvodno zavarivanje

2.2.1. Povijesni razvoj postupka

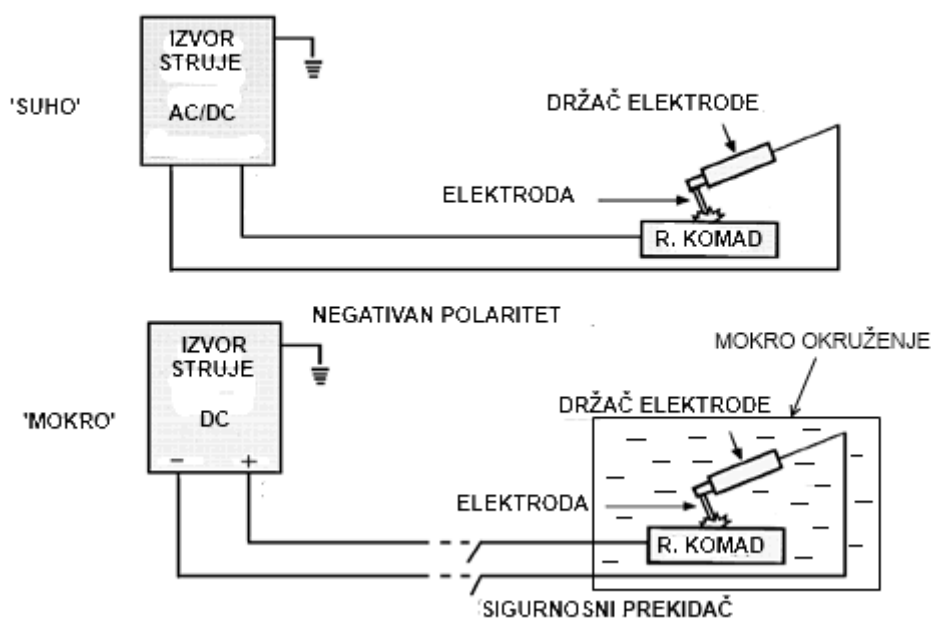
Prvi izvještaji koji spominju primjenu podvodnog «oxy-arc» rezanja potječu iz 1918. godine gdje se opisuju popravci na parnom brodu St. Paul. Tijekom II. svjetskog rata zabilježeno je više slučajeva podvodnog zavarivanja i rezanja pri čemu se izdvaja raščišćavanje potonulog brodovlja u luci Peral Harbor. Već tada sinonim za mokro podvodno zavarivanje bio je REL postupak ili ručno elektrolučno zavarivanje. Glavno područje primjene, osim brtvljenja pukotina odnosno otvora u trupovima brodova ispod vodene linije bilo je, a i danas je izgradnja luka i obala, a tu prije svega popravak čeličnih vodonepropusnih zidova. Razvojem off-shore tehnologije "mokro" elektrolučno zavarivanje korišteno je u nizu slučajeva za popravke na plovnim off-shore postrojenjima, platformama, podvodnim spremnicima i cjevovodima. Vrsta spoja, kojoj se davala prednost, bio je kutni spoj, a osnovni materijal koji se zavarivao bio je lim. Dubine, na kojima su se izvodili zavarivački zahvati, zanemarujući izuzetke, bile su u području do 50 m, u kojem se prema propisu o sprječavanju nezgoda ovisno o maksimalnom trajanju ronjenja kao zrak smije koristiti komprimirani zrak. Iako je u Meksičkom zaljevu provedeno jedno pokusno zavarivanje na dubini od 180 m, "mokro" ručno elektrolučno zavarivanje se, koliko je poznato, nije koristilo na dubinama većim od 70 m, uz uvjet da su se pritom koristile posebne mješavine za disanje. Ta dubina mnogim praktikantima vrijedi kao granica za "sigurno" REL zavarivanje sa dovoljno velikim mjehurom pare i plina u području mjesta podvodnog zavarenog spoja. U ovom kontekstu treba istaknuti još i to, da ronionci-zavarivači, na dubinama ispod 50 m mogu koristiti samo specijalne smjese plina za disanje, čiji su sastojci kisik, dušik i/ili helij. To također vrijedi i za područja dubine 10-50 m, ako su zbog trajanja ronjenja na tim dubinama potrebni uvjeti zasićenja pri ronjenju. Iako se u državama bivšeg SSSR-a razvijao MIG/MAG postupak zavarivanja punjenom žicom, a u Japanu 90-tih tehnika "zavarivanja s vodenom zavjesom", mehanizirani proces kod kojeg stožasti mlaz vode služi kao "zavjesa", ručno elektrolučno zavarivanje pokazalo se kao najprimjenjivija tehnika mokrog podvodnog zavarivanja. [6]

2.2.2. Osnovne karakteristike mokrog podvodnog zavarivanja

Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje sakupljene su u «AWS D3.6 - specifikaciji za mokro podvodno zavarivanje» koja mokro zavarivanje opisuje kao proces u kojem su i ronionici i električni luk u direktnom kontaktu s vodenom okolinom. Glavne prednosti mokrog zavarivanja u odnosu na hiperbaričko zavarivanje su niski troškovi i jednostavnost izvođenja. Dok je kod hiperbaričkog zavarivanja potrebna velika količina prateće nadvodne i podvodne tehničke podrške čiji su troškovi pokretanja i održavanja golemi, kod mokrog zavarivanja to nije slučaj. Dalje, fleksibilnost tehnike mokrog zavarivanja neusporedivo je veća u odnosu na hiperbaričko zavarivanje gdje je potrebno posebno konstruiranje komora zavisno o prostoru na kojem se zavarivanje izvodi. No ipak, kvaliteta zavarenih spojeva dobivenih mokrim zavarivanjem ne može se mjeriti sa zavarenim spojevima dobivenim hiperbaričkim zavarivanjem. Glavni razlog tome jest vodena okolina u kojoj se zavarivanje odvija. Ona izaziva intenzivno odvođenje topline, tj. hlađenje, koje uzrokuje povećanu tvrdoću zavarenog spoja. Time nastaju zavareni spojevi niske žilavosti i rastezljivosti, koja dolazi do izražaja u malim kutevima savijanja, što nije poželjno kod off-shore konstrukcija. [6] Osim toga, zavareni spojevi dobiveni mokrim zavarivanjem imaju visoki udio vodika u svojoj mikrostrukturi, te su skloni nastanku hladnih pukotina. Zato se mokro zavarivanje prvenstveno primjenjuje za spojeve nižih mehaničkih zahtjeva. Da bi se postigla prihvatljiva kvaliteta zavarenih spojeva pri mokrom podvodnom zavarivanju, potrebno je ispuniti više uvjeta. Prvo, dobro uvježbani i educirani ronionici-zavarivači temelj su aktivnosti podvodnog zavarivanja. Za vrijeme treninga ronionica-zavarivača, posebno se naglašava tehnika rada. Upućuje se na to da nepravilna tehnika rada pri zavarivanju povećava udio vodika i porozitet u metalu zavara. Ronionici-zavarivači moraju imati izvjesne vještine zavarivanja u realnim uvjetima i na različitim praktičnim zadacima, kako bi se izbjegle pojave grešaka. Uz umijeće zavarivanja, velika pažnja poklanja se i vještini ronjenja. Od posebne važnosti je dobra koordinacija između ronionica-zavarivača i tima na površini. Kod mokrog podvodnog zavarivanja i rezanja postoji velika opasnost od električnog šoka. Zbog toga je veoma bitna dobra komunikacija kako bi se održala sigurnost zavarivača i učinkovitost rada. [4]

2.2.3. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja

Kao što je prije bilo navedeno, mokro podvodno zavarivanje prvenstveno se odvija REL-postupkom zavarivanja. Na donjem dijagramu [Slika 7.] dan je prikaz ručnog elektrolučnog zavarivanja u suhoj i mokroj okolini.



Slika 7. Prikaz REL zavarivanja u suhoj i mokroj okolini [11]

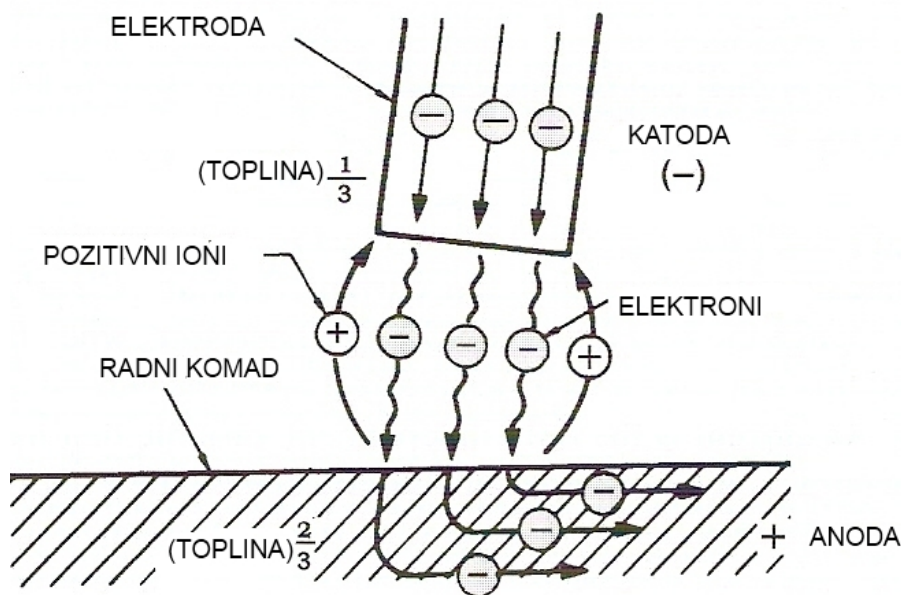
Kao što je vidljivo princip je sličan, iako postoje razlike u opremi koja se koristi. Radni komad povezan je preko kabela sa izvorom struje. Obložena elektroda nalazi se u držaču za elektrodu te je preko drugog kabela povezana sa drugim polom izvora struje. Kada elektroda dođe u kontakt s radnim komadom dolazi do električnog kontakta. Pritom se uspostavlja električni luk koji tali površinu radnog komada i elektrodu. Ako se luk dalje pomiče po radnom komadu ili se prekine, nastala talina će se skrutiti te će nastati zavareni spoj. Bitna razlika između mokrog i suhog REL zavarivanja jest u izvoru struje. Dok se za zavarivanje na suhom mogu koristiti izvori koji daju istosmjernu ili izmjeničnu struju, kod mokrog REL zavarivanja koriste se samo izvori koji mogu dati istosmjernu struju. Tijekom razvoja mokrog podvodnog zavarivanja znanstveno se dokazalo da istosmjerna struja pod vodom stvara stabilniji električni luk od izmjenične struje te da ga je lakše uspostaviti. Osim toga korištenjem istosmjerne struje opasnost od strujnog udara za zavarivača znatno je manja.

Nadalje, kablovi koji zatvaraju strujni krug dobro su izolirani od vodene okoline dvostrukom oblogom. Na kraju je pri mokrom podvodnom zavarivanju iz sigurnosnih razloga potrebno imati sigurnosni prekidač koji se nalazi izvan vode, a čijim se pritiskom zatvara strujni krug. Kako se radi o REL postupku jedina nezavisna varijabla koju možemo kontrolirati jest jačina struje koja ovisi o vrsti i promjeru elektrode. [11]

2.2.4. Polaritet pri mokrom podvodnom zavarivanju

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja toplinu potrebnu za taljenje elektrode i osnovnog materijala daje električni luk. Električni luk može se opisati kao intenzivno izbijanje naboja u jako ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koji potječu od metala i obloge elektrode te zaštitnih plinova ili praškova. [12]

Kod mokrog podvodnog zavarivanja električni luk se održava u parno-plinskoj atmosferi nastaloj izgaranjem obloge elektrode te disocijacijom vode u električnom luku. Duljina električnog luka neposredno je povezana s naponom, a definirana je kao udaljenost između vrha elektrode i površine radnog komada. Povećanjem duljine električnog luka raste i napon potreban da bi se električni luk održao između radnog komada i vrha elektrode. Male oscilacije u vrijednosti napona tijekom zavarivanja su uobičajene i ne utječu bitno na kvalitetu zavora. Oscilacije iznad 4-5 V mogu znatno narušiti kvalitetu zavora stoga je važno da ronioc-zavarivač ima vrlo dobru tehniku rada. Električni luk je podijeljen na 3 područja generiranja topline, a to su katoda, anoda i plazma. Da bi struja tekla s vrha elektrode na radni komad potrebna je visoka koncentracija elektrona, stoga električni luk za zavarivanje karakterizira visoka jakost struje te nizak napon. Elektroni su emitirani sa katode te se gibaju zajedno sa negativnim ionima u plazmi prema anodi. Pozitivni ioni se gibaju u suprotnom smjeru. Na idućoj slici prikazan je slučaj kada je elektroda spojena na negativan, a radni komad na pozitivan pol izvora struje. Navedeno se naziva negativan polaritet i gotovo uvijek se koristi kod ručnog elektrolučnog zavarivanja pod vodom. Temperaturno područje električnog luka kreće se između 5000-7000 °C, od čega se približno 65-70% topline generira na anodi (+ pol), 10-20% topline na katodi (- pol), a ostalih 15-20% topline gubi se u okolini preko mjehurića [Slika 8.]. [11]

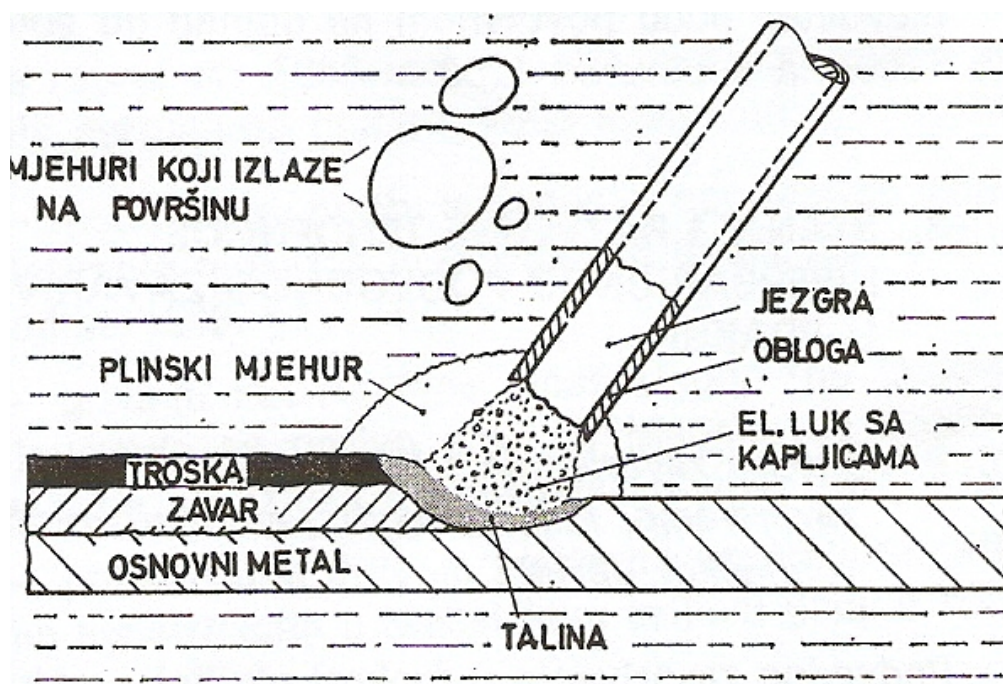


Slika 8. Negativan polartiet [11]

Razlog tako velikom gubitku topline u vodenj okolini je velika razlika u temperaturi između vode (5-20°C) i električnog luka (5000-7000 °C). Iz ovog razlika postoji pravilo da jakost struja za zavarivanje pod vodom bude za 15% viša od jakosti struje koju bi koristili za iste uvjete pri zavarivanju na suhom. Korištenjem negativnog polariteta većina topline generirat će se na radnom komadu, taljenje elektrode biti će postepeno i jednoliko, a nastali plinski mjehuri pravilnijeg oblika. Pozitivan polaritet rijetko se koristi, uglavnom pri zavarivanju elektrodama većih promjera (Ø4 mm) za zavarivanje debljih radnih komada. Korištenjem pozitivnog polariteta većina topline generirat će se na elektrodi što će izazvati njezino ubrzano taljenje i time brzu popunu zava. [11]

2.2.5. Plinski mjehur

Kod zavarivanja na suhom zbog visoke temperature električnog luka, 5000-7000 °C, metal je kemijski aktivan s glavnim sastojcima zraka, kisikom i dušikom. Ako bi talina metala zavora došla u doticaj sa zrakom došlo bi do stvaranja oksida i nitrida koji bi izazvali pojavu korozije te bi pri skrućivanju taline došlo do znatne degradacije mehaničkih svojstva zavarenog spoja. Iz ovog razloga različiti elektrolučni postupci koriste razne metode zaštite taline od okolne atmosfere. U općoj uporabi za to se koriste zaštitni plinovi, pare, praškovi te troska. Kod mokrog ručnog elektrolučnog zavarivanja zbog velike razlike između temperature vode i električnog luka dolazi do trenutnog isparenja vode oko električnog luka te stvaranja relativno stabilnog plinskog mjehura [Slika 9.]. Nastali plinski mjehur štiti talinu pri prijenosu s vrha elektrode do radnog komada te joj smanjuje brzinu hlađenja zbog čega će nastali zavar imati bolju mikrostrukturu, a samim time i bolja mehanička svojstva. Volumen plinskog mjehura raste sve dok njegov polumjer ne postane tangenta inicijalne praznine, zatim se odvaja i ide prema površini, a na njegovom mjestu momentalno nastaje novi plinski mjehur. Ovaj proces ponavlja se sve do prekida električnog luka. [13]



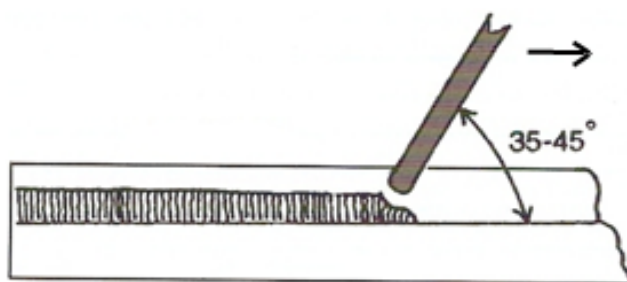
Slika 9. Prikaz procesa mokrog zavarivanja [6]

2.2.6. Osnovne tehnike rada

Prema priručniku za mokro podvodno zavarivanje pri mokrom podvodnom zavarivanju koriste se 3 osnovne tehnike rada; tehnika povlačenja, tehnika njihanja te "korak-unatrag tehnika". [11]

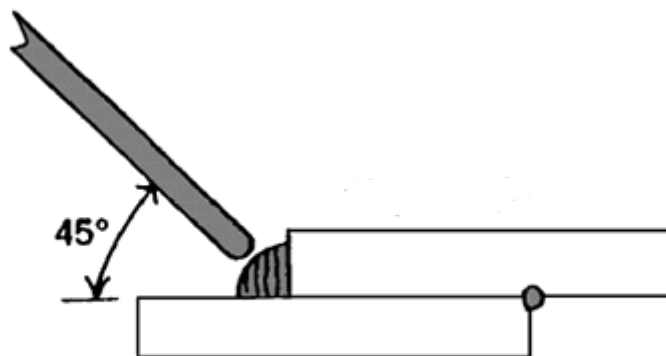
2.2.6.1. Tehnika povlačenja (Drag technique)

Kod tehnike povlačenja [Slika 10.], ronioc-zavarivač povlači elektrodu po radnom komadu, pritom održavajući lagani pritisak na elektrodu dok se ona tali. [11]



Slika 10. Tehnika povlačenja [11]

Uzimajući u obzir da pritom održava pravilan kut nagiba elektrode u odnosu na radni komad i jednoliku brzinu povlačenja, nastati će pravilan sloj zavarenog spoja. Brzina povlačenja elektrode po radnom komadu (brzina zavarivanja) direktno je povezana s kutom nagiba elektrode. Što je kut nagiba elektrode veći, brzina povlačenja elektrode biti će manja, nastali sloj zavaća širi, a penetracija veća. Kod mokrog zavarivanja kut nagiba elektrode mora biti oko 35-45° zato što se time nastali plinski mjehuri mogu odvajati od električnog luka a da pritom ne ometaju taljenje elektrode. [11]

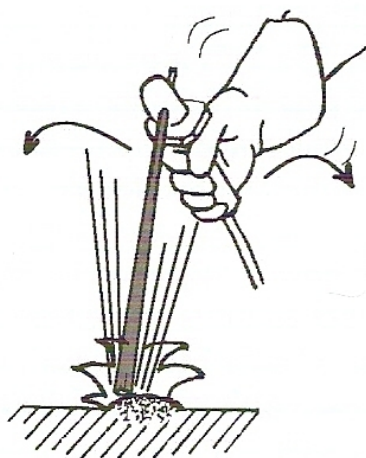


Slika 11. Kut nagiba elektrode kod kutnog zavaća [11]

Tehnika povlačenja podobna je za stvaranje kutnih [Slika 11.] i sučeljenih spojeva, a može se jednostavno koristiti u svim položajima zavarivanja.

2.2.6.2. Tehnika njihanja (*Oscillation technique*)

Kod tehnike njihanja elektroda se njiše tako da se u točki najbližoj držaču elektrode diže i spušta u vertikali, a time se kut nagiba elektrode konstantno mijenja tijekom zavarivanja [Slika 12.]. [11]

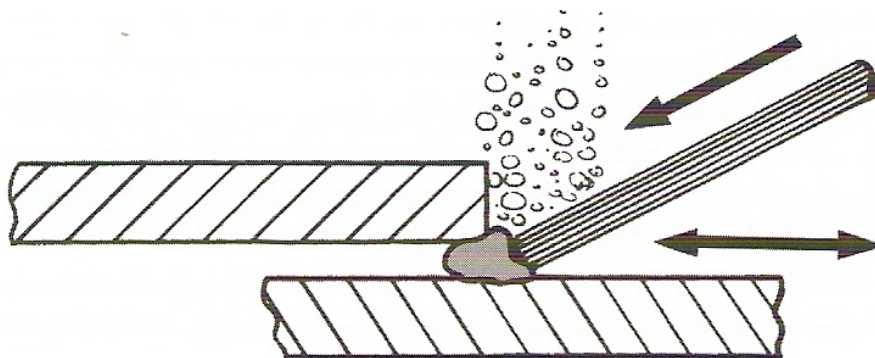


Slika 12. Tehnika njihanja [11]

Ovime se postiže veći depozit metala te se spriječava nekoncentrično izgaranje elektrode, posebice pri zavarivanju korijena zavora. Kako je kut nagiba elektrode kod mokrog REL zavarivanja nešto manji nego kod suhog i kako se elektroda drži u stalnom kontaktu s radnim komadom ubrzo bi tijekom zavarivanja došlo do nekoncentričnog izgaranja elektrode po njenom promjeru. Pritom bi se električni luk savinuo prema najbližoj točki radnom komadu te bi se time onemogućila pravilna kontrola nad depozitom metala zavora. Kako bi se to spriječilo kut nagiba elektrode se mijenja tehnikom njihanja. Ovo je najbolja tehnika za zavarivanje korijena zavora kod kutnih spojeva. [11]

2.2.6.3. "Korak-unatrag" tehnika (Step-back technique)

Korištenjem ove tehnike ronioc odugovlači pomicanje elektrode dalje duž žlijeba na trenutak tako da ju pomiče nekoliko milimetara natrag u talinu zavora [Slika 13.]. Time se potiču veća čvrstoća i širina zavarenog spoja, a smanjuje se brzina hlađenja taline čime nastali zavareni spoj ima bolja mehanička svojstva. Kod zavarivanja kutnih spojeva u tri prolaza, ova tehnika je idealna za zadnji prolaz, jer se njome uklanjaju sve manje greške nastale pri drugom prolazu uslijed netočnog pozicioniranja sloja zavora. Treba napomenuti da su kutni spojevi daleko najčešće korišteni u praksi pri mokrom ručnom elektrolučnom zavarivanju, i da se uvijek ostvaruju u najmanje 3 prolaza. [11]



Slika 13. "Korak unatrag" tehnika [11]

2.2.7. Dodatni materijali

Za dobivanje zavarenih spojeva odgovarajuće kvalitete pri mokrom podvodnom zavarivanju potrebno je koristiti elektrode s posebnom vodonepropusnom oblogom. Obložena elektroda sastoji se od metalne jezgre na koju je koncentrično nanescena nemetalna obloga, čiji sastav određuje vrstu elektrode. Metalna jezgra elektrode mora biti od istog ili sličnog materijala kao i radni komad, a obloga se određuje prema osnovnom metalu, zahtjevima kvalitete zavarenog spoja i uvjetima pri zavarivanju. Metalna jezgra elektrode za opću uporabu dobiva se rezanjem niskougljične čelične žice na potrebnu dužinu, a obloga nastaje mješanjem raznih minerala i kemikalija. Metalna jezgra ima ulogu vodiča za struju te glavnog metala za popunu spoja. [11]

Funkcije obloge su [11]:

1. Osigurava uspostavljanje i lako održavanje električnog luka.
2. Taljenjem stvara zaštitnu plinsku atmosferu oko električnog luka i taline metala, koja sprječava kontaminaciju zavarenog spoja kisikom i vodikom nastalim disocijacijom vode.
3. Osigurava nastanak troske koja štiti zavar od utjecaja atmosfere te smanjuje brzinu hlađenja. Troska mora biti takva da ju je moguće jednostavno ukloniti.
4. Sadrži legirne elemente koji poboljšavaju mehanička svojstva zavarenog spoja.
5. Štiti elektrodu od kontakta s vodom.
6. Olakšava zavarivanje u prisilnim položajima.

Obloge elektroda mogu biti [14]:

- a) kisele (A - acide)
- b) bazične (B - basic)
- c) celulozne (C - cellulosic)
- d) rutilne (R - rutile)
- e) oksidne (FeO, SiO₂)

Kisele elektrode nije preporučljivo koristiti za zavarivanje čelika sa povišenim sadržajem sumpora radi opasnosti od toplih pukotina. Ove elektrode mogu se koristiti u svim položajima zavarivanja uz primjenu istosmjerne ili izmjenične struje za zavarivanje. Pri normalnim uvjetima zavarivanja (bez vlažnosti okoline, uz dobro skladištenje i rukovanje) nije ih potrebno posebno sušiti. Ne koriste se za podvodno mokro zavarivanje. [14]

Bazične elektrode daju zavareni spoj dobrih mehaničkih svojstava (ovo se odnosi posebno na izduženje i žilavost), a zbog manje prisutnosti štetnih plinova i nemetalnih uključaka u metalu zavara smanjena je i sklonost nastanku pukotina i poroznosti. Naime, sastav troske dobivene zavarivanjem bazičnim elektrodama veže O_2 , H_2 , S i P na sebe. Popratana pojava jest da se troska teško odstrani nakon završetka zavarivanja. Zbog visokog sadržaja CaF_2 u sastavu bazičnih elektroda smanjena je stabilnost električnog luka pri zavarivanju, stoga se elektrode sa bazičnom oblogom također ne koriste pri mokrom podvodnom zavarivanju. Najčešće se primjenjuju kod zavarivanja konstrukcija sa visokim zahtjevima za mehanička svojstva i kvalitetu. [14]

Rutilne elektrode pokazale su najbolja operativna svojstva za primjenu pri mokrom podvodnom zavarivanju. Jedan od glavnih razloga tome jest odlična stabilnost električnog luka pri zavarivanju ovim elektrodama. Zavareni spojevi dobiveni korištenjem rutilnih elektroda posjeduju dobra mehanička svojstva, lijep izgled te mogućnost jednostavnog otklanjanja troske nakon završetka zavarivanja. U odnosu na bazične elektrode, zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama posjeduju slabiju žilavost u metalu zavara. Mogu se koristiti pri zavarivanju istosmjernom ili izmjeničnom strujom. [14]

Celulozne elektrode koriste se za zavarivanje u svim položajima koristeći pritom istosmjernu ili izmjeničnu struju. Posjeduju veliku brzinu taljenja, a troska im se lako otklanja. Radi velikog provara koriste se za zavarivanje korijena cijevi. [14]

Metalna jezgra elektrode može biti od [11]:

- a) niskougličnog mekog čelika (C/Mn)
- b) niskolegiranog čelika
- c) autenitnog nehrđajućeg čelika
- d) elektrode na bazi nikla

Elektrode od niskougljičnog mekog čelika (C/Mn) koriste se za opću uporabu i prikladne su za zavarivanje niskougljičnih čelika. Za zavarivanje čelika s višim udjelom ugljika ili legiranih elemenata u svom sastavu koriste se elektrode od austenitnog nehrđajućeg čelika te elektrode na bazi nikla. Zavareni spojevi dobiveni austenitnim nehrđajućim elektrodama i elektrodama na bazi nikla mogu u svom sastavu zadržati vodik u krutom stanju te se time smanjuje učestalost nastajanja hladnih pukotina u ZUT-u. Ipak, korištenjem austenitnih nehrđajućih elektroda na dobivenim zavarenim spojevima javlja se ravnomjerno raspoređen porozitet. Zavareni spojevi dobiveni takvim elektrodama imati će dobru vlačnu čvrstoću, no zbog razlike u toplinskoj ekspanziji između osnovnog metala (feritni) i elektrode (austenitna) nastali zavareni spojevi biti će podložni pucanju uslijed velikih zaostalih naprezanja. Kod elektroda na bazi nikla to nije slučaj. Iako zavareni spojevi dobiveni austenitnim nehrđajućim elektrodama imaju manju opasnost od nastajanja hladnih pukotina, zbog pukotina u metalu zavora uz granicu ZUT-a njihova uporaba je ograničena. Zavareni spojevi nastali elektrodama na bazi nikla također su pokazali dobru otpornost na pojavu hladnih pukotina u ZUT-u. Kako je razlika u toplinskoj ekspanziji između osnovnog metala (ferit) i metala zavora (nikl) manja, pritom neće doći ni do pucanja uslijed zaostalih naprezanja. Korištenje elektroda na bazi nikla ograničeno je dubinom, te se pri dubinama većim od 10 m na zavarenim spojevima stvara visoki udio porozitet. Naime, zbog nedovoljnog unosa topline, plinovi nastali izgaranjem elektrode ne stignu difundirati iz metala zavora. Daljnjim razvojem izvora energije i obloga elektroda eksploatacija elektroda na bazi nikla mogla bi se povećati. [15]

Najbolja operativna svojstva pokazale su rutilne elektrode sa binarnim premazom. Prvi sloj premaza je električki provodljiv te osigurava lako uspostavljanje i održavanje električnog luka. Osim toga je u određenoj mjeri nepromočiv te ima vrlo dobra mehanička svojstva. Drugi, vanjski sloj je električni izolator sa odličnim mehaničkim svojstvima i izvanrednom vodonepropusnošću. Prvenstvena zaštitna funkcija sekundarnog (vanjskog) sloja jest da omogućava uporabu ovakvih elektroda u kemijski agresivnim sredinama, te pri većim dubinama. Kod ostvarivanja ovakvih binarnih kombinacija potrebno je obratiti pažnju na njihovu međusobnu kemijsku neutralnost, kako nebi došlo do njihovog spontanog mješanja te stvaranja jedne nedefinirane prevlake. [16] Kvaliteta obloge posredno određuje kvalitetu zavarenog spoja. Dodatne zalihe rutilnih elektroda moraju biti pohranjene na suhim mjestima temperature 15-30 °C. Ako je potrebno, proces sušenja odvija se pri maksimalnoj temperaturi od 80 °C u trajanju od 1 sat. Treba napomenuti da obloga ipak nemože štititi elektrodu tijekom dužeg perioda pod vodom.

Stoga se u pravilu ne uranja pod vodu više elektroda nego što se može iskoristiti u približno 30 minuta. [11] Na idućim slikama prikazane su elektrode za podvodno zavarivanje Navy 1 i Navy 2 razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu [Slika 14. i 15.]. [16]



Slika 14. Navy 1 i Navy 2 elektrode [16]



Slika 15. Presjek elektroda Navy 1 i Navy 2 nakon procesa zavarivanja [16]

Ove elektrode imaju dvostruki zaštitni premaz koji omogućava laganu uspostavu i vođenje električnog luka, te sprječava raspad obloge. Jedna od značajnih karakteristika novorazvijenih elektroda jest uspostavljanje električnog luka bez mehaničkog skidanja zaštitnog sloja. Na taj se način povećava operativnost ronioca-zavarivača, kao i stupanj iskorištenja vremena boravka pod vodom. Osim rutilnih elektroda kod kojih se ne može kontrolirati udio disociranog vodika u zavaru postoje još i posebne elektrode koje se tijekom proizvodnje podvrgavaju dodatnim toplinskim procesima kako bi se udio vlage u njima

maksimalno smanjio. Korištenjem takvih elektroda nastali zavareni spojevi imati će manji udio vodika nego zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama. Proizvođači elektroda za mokro podvodno zavarivanje razvili su vlastite elektrode po pitanju sastava obloge, metala za popunu zavara i vodonepropusnog sloja, tako da svaka elektroda ima specificirano kad, gdje i pri kojim parametrima se koristi. [11]

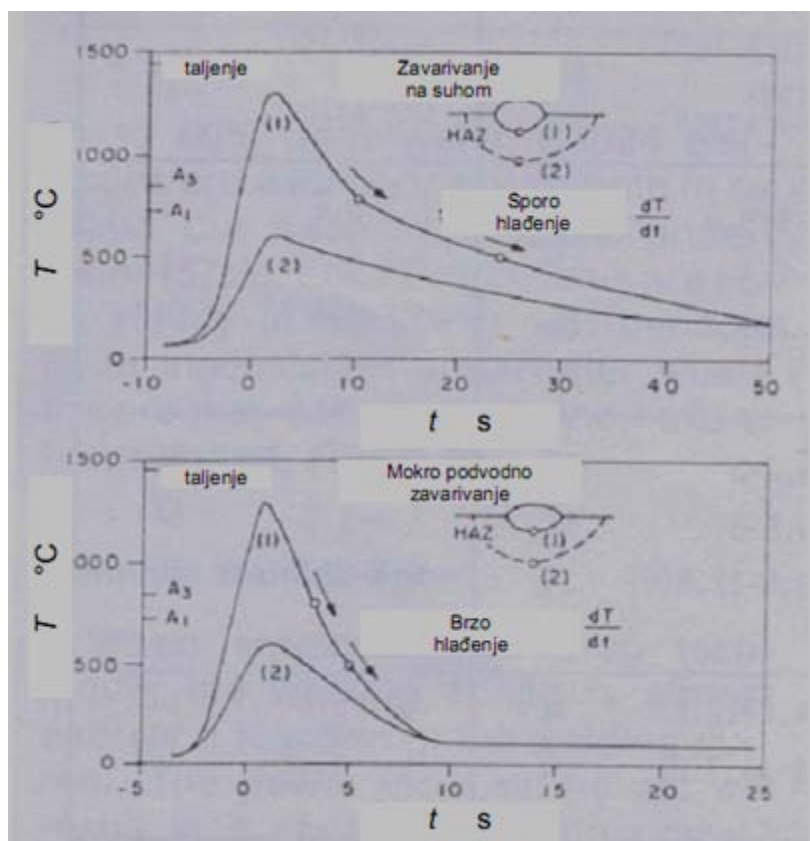
Odabir odgovarajuće elektrode za neki proces zavarivanja provodi se prema slijedećim kriterijima [12]:

- a) struktura osnovnog metala
- b) potrebna mehanička svojstva zavara
- c) metalurški zahtjevi
- d) mogućnost nastanka pukotina
- e) dubina na kojoj se zavarivanje odvija
- f) vrsta zavara (kutni, sučeljeni, preklopni)
- g) pozicija zavarivanja (npr. 2G ili 4F)

Mogućnost nastanka pukotina na zavaru direktno je povezana sa penetracijom zavarivanja, unosom topline, vrstom i pozicijom zavara te su to glavni kriteriji za odabir elektrode. Za svaku vrstu elektrode postoje točno određeni parametri i pozicije na kojima se može koristiti.

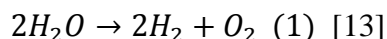
2.2.8. Problemi pri mokrom podvodnom zavarivanju

Slaba kvaliteta zavarenih spojeva nastalih pod vodom direktna je posljedica vodene okoline u kojoj se zavarivanje odvija. Direktna doticaj vode s električnim lukom i talinom metala zavara izaziva niz problema kod mokrog podvodnog zavarivanja. Zbog naglog hlađenja, koje je 4 do 5 puta brže nego pri zavarivanju na suhom dolazi do nastanka zavarenih spojeva s povišenom tvrdoćom. Brzo hlađenje taline rezultat je visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode te velike razlike u temperaturi između vode i taline. Zavareni spojevi dobiveni mokrim podvodnim zavarivanjem uslijed naglog hlađenja imaju određeni udio martenzita u svojoj mikrostrukturi što uzrokuje visoku tvrdoću, a nisku žilavost i čvrstoću. Zbog krhke i zakaljane strukture nastali zavareni spojevi podložni su pucanju. Tvrdoća u području zone utjecaja topline može doseći vrijednosti iznad 350 HV10. Vrijeme hlađenja taline između 800 i 500°C ($t_{8/5}$), zavisno o parametrima zavarivanja i uvjetima okoline, iznosi između 2 i 4 sekunde dok kod zavarivanja na suhom vremensko trajanje hlađenja u tom temperaturnom području iznosi oko 16 sekundi. Na slici 16. prikazana je usporedba intenziteta hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima na suhom i pri mokrom podvodnom zavarivanju. [13]

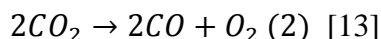


Slika 16. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima (gornji dio dijagrama) i mokrom podvodnom zavarivanju (donji dio dijagrama) [13]

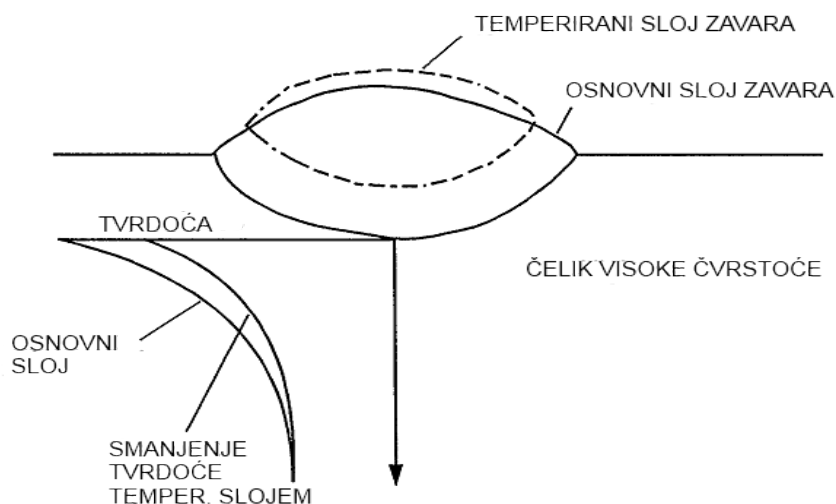
Kao što je prije bilo navedeno visoka temperatura električnog luka izaziva disocijaciju vode:



Izgaranjem obloge elektrode doći će do izlučivanja ugljika koji zajedno sa kisikom tvori ugljični dioksid, koji također disocira prema reakciji:



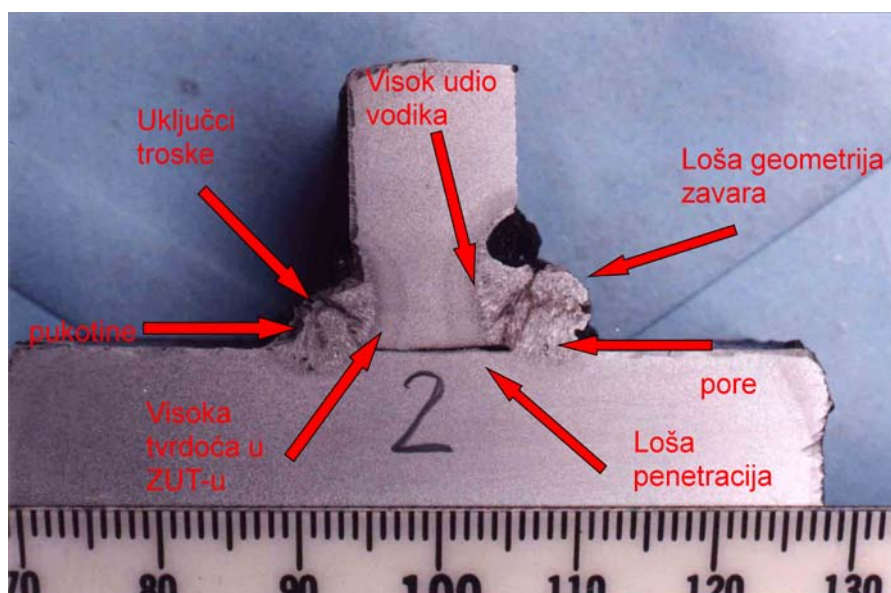
Prema navedenim reakcijama, kroz isparavanje i disocijaciju vode te izgaranjem obloge elektrode formiraju se sljedeći plinovi: 62-82% H_2 , 11-24% CO , 4-6% CO_2 i ostali udio čine O_2 i N_2 . Velika količina vlage uzrokuje povećavanu koncentraciju disociranog vodika u zavarenom spoju, te će nastali zavareni spoj imati 30 do 80 ml $H_2/100g$ zavara. Glavni izvor vodika u zavarenom spoju jest disocijacija okolne vode iako on također može biti rezultat vlage iz obloge elektrode. Zbog povišene koncentracije disociranog vodika u strukturi zavarenog spoja, tvrde i krhke mikrostrukture (bainitno-martenzitna), te velikih zaostalih naprezanja uslijed naglog hlađenja, nastali zavareni spojevi biti će podložni nastajanju hladnih pukotina. Ovome doprinose i brojne mikropukotine koje također nastaju uslijed naglog hlađenja taline zavarenog spoja, zbog čega plinovi u talini ne stignu difundirati u okolinu. Za smanjenje udjela difundiranog vodika koriste se posebne tehnike rada kojima se smanjuje brzina hlađenja te se provodi toplinska obrada prethodno nataljenih slojeva [Slika 17.]. [15]



Slika 17. Temperirani sloj zavarenog spoja [15]

Gotovo u svim zavarenim spojevima nastalim pod vodom doći će do lokalnog stvaranja martenzitne strukture uz liniju staljivanja. Širina ovog međusloja obično nije veća od 0.5 mm, a djeluje kao barijera difuziji vodika.

Plinovi koji nisu uspjeli difundirati iz taline zbog prenoglog hlađenja smanjuju mehanička svojstva nastalog zavarenog spoja te su potencijalni inicijatori pukotina. Porastom dubine raste i hidrostatski tlak koji može uzrokovati prodiranje vode u oblogu elektrode te slabija operativna svojstva električnoga luka. Visoki hidrostatski tlak uzrokuje suženje luka te povećani gubitak topline u okolinu. Ova pojava uzrokuje lošu geometriju zavora, uključke troske u zavaru, porozitet i nedovoljnu penetraciju. Iako bi zbog razlike u gustoći troska trebala isplivati na površinu, dio nje ostaje zarobljen u zavarenom spoju zbog prenoglog hlađenja te se time dodatno narušavaju mehanička svojstva zavarenoga spoja. Na slici 18. prikazane su sve karakteristične pojave grešaka na zavarima dobivenim mokrim podvodnim zavarivanjem. [12]

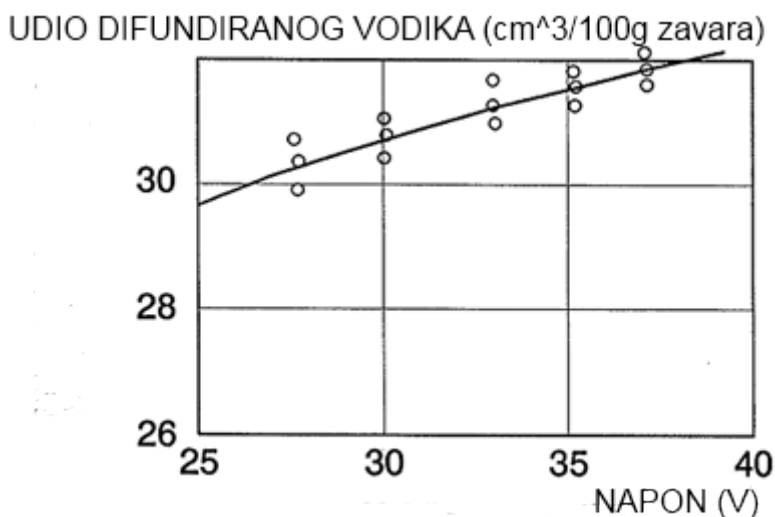


Slika 18. Karakteristične greške u zavarenom spoju nastalom mokrim podvodnim zavarivanjem [12]

Zavareni spojevi dobiveni pod vodom u pravilu sadrže 90% vlačne čvrstoće i tek 50% duktilnosti u odnosu na zavarene spojeve dobivene pri suhim uvjetima zavarivanja. Zbog visokog udjela kisika u stupcu električnoga luka, dolazi do oksidacije i smanjenja legiranih elemenata u metalu zavora. [11] Smanjena vidljivost i mjehurići koji nastaju tijekom zavarivanja otežavaju praćenje procesa zavarivanja ronjocu-zavarivaču. Svi navedeni problemi razlog su što se tehnike mokrog podvodnog zavarivanja smatraju lošima, međutim njihov status se mijenja u proteklih 10-tak godina intenzivnim razvojem novih tehnika rada, opreme, propisa i procedura zavarivanja. [4]

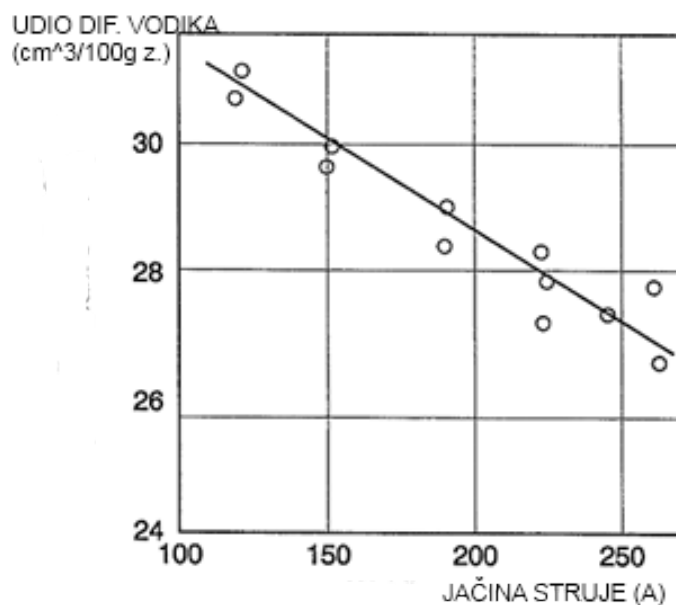
2.2.9. Utjecaj parametara na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju

Istraživanja su pokazala da postoji veza između parametara zavarivanja (struja, napon, polaritet) i udjela difundiranog vodika u metalu zavara. Na slici 19. prikazan je utjecaj napona zavarivanja na rastvorivost vodika u metalu zavara. [15]



Slika 19. Utjecaj napona zavarivanja na rastvorivost vodika [15]

Na slici je vidljivo da porastom napona raste i udio vodika u metalu zavara. Ako je u pitanju struja zavarivanja, njezinim porastom udio difundiranog vodika u metalu zavara biti će manji, kako je prikazano na slici 20.



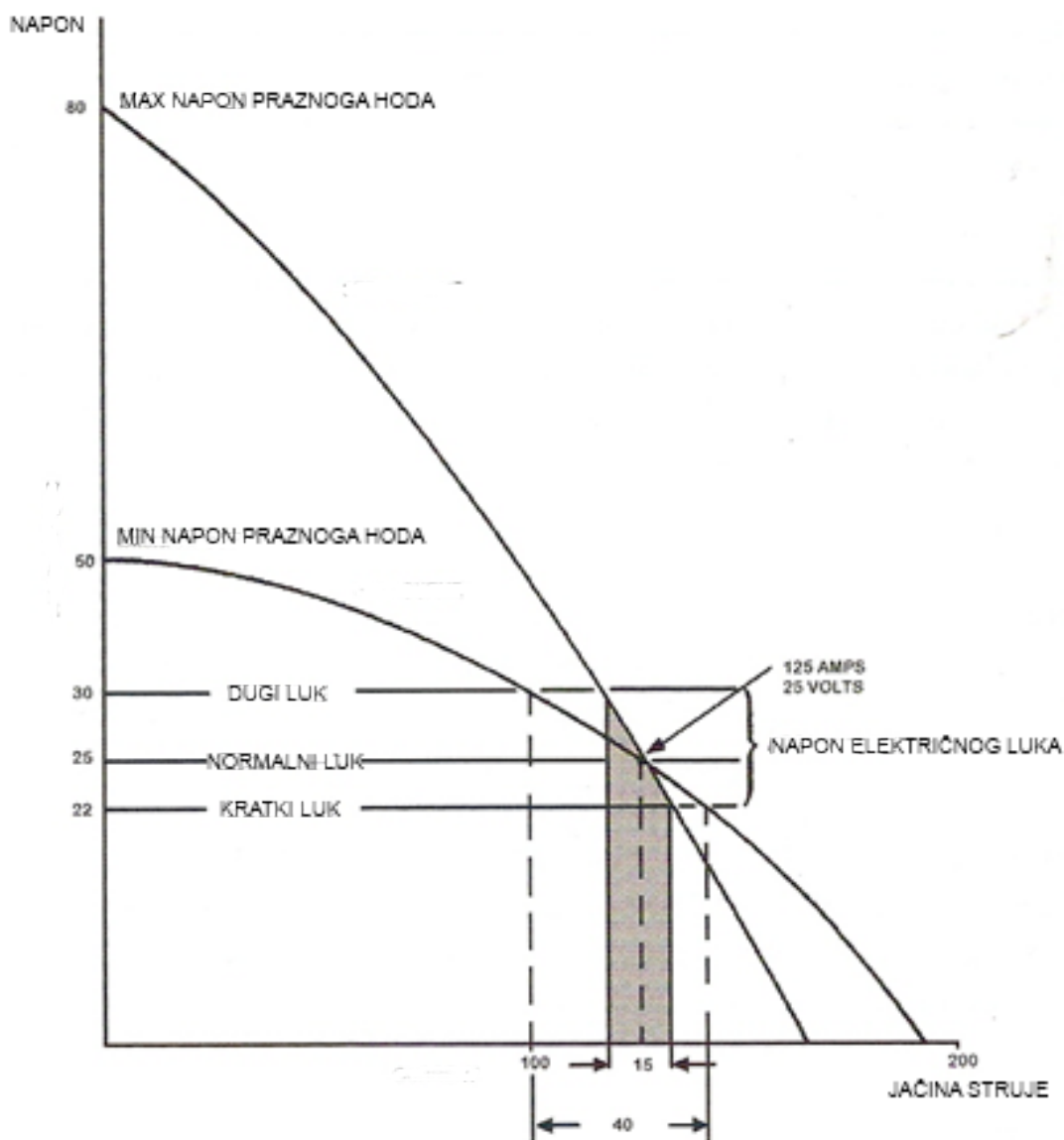
Slika 20. Utjecaj jačine struje na rastvorivost vodika [15]

Dakle zavarivanjem jakom strujom i niskim naponom udio vodika u metalu zavara biti će maksimalno reduciran. Također je dokazano da se pri većem unosu topline te odabirom negativnog polariteta udio vodika u zavarenom spoju smanjuje. [11]

2.2.10. Oprema pri mokrom podvodnom zavarivanju

Oprema koja se koristi za mokro zavarivanje veoma je slična opremi za rad na suhom, uz određene modifikacije koje su nužne iz sigurnosnih razloga. Opremu možemo podijeliti prema primjeni na opremu za zavarivanje te opremu za ronjenje. Oprema za ronjenje uključuje suho ronilačko odijelo, masku za suho odijelo te crijevo za vanjsku dobavu. Ono se koristi za dobavu zraka i komunikaciju sa timom na površini preko žičane veze. Crijevo je na površini spojeno sa spremnikom zraka. Oprema za zavarivanje se sastoji od istosmjernog izvora struje sa obavezno nižim naponom praznog hoda (kako bi se umanjila opasnost od strujnog udara za ronioca-zavarivača), specijalnih kablova s pojačanom izolacijom, pištolja za zavarivanje te posebnih elektroda za mokro podvodno zavarivanje. Da bi se osigurali pogodni uvjeti za sve vrste podvodnih zavarivačkih radova potrebno je imati izvor struje koji može osigurati minimalno 300 A. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon i primjerena svojstva za zavarivanje pod vodom. Također se upotrebljavaju tranzistorski izvori struje, a daljnja istraživanja upućuju na to da sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Intenzivno dinamičko ponašanje izvora struje potrebno je za ostvarivanje električnog luka u većim dubinama. Korištenjem slabijih strojeva produžuje se vrijeme zavarivanja, a time i vrijeme boravka zavarivača pod vodom. Povećanjem dubine na kojoj se zavarivanje odvija raste i potrebna dužina kabela za zavarivanje, što može izazvati pad napona zbog velike udaljenosti koju struja mora prijeći od izvora do radnog komada. Stoga izvori struje za mokro podvodno zavarivanje moraju moći dati dovoljno visok napon praznoga hoda (Open Circuit Voltage). Izvori struje za ručno elektrolučno zavarivanje na kopnu imaju strmopadajuću karakteristiku [Slika 21.]. Smisao strmopadajuće karakteristike jest da manje promjene dužine električnog luka, tj. napona ne utječu znatno na vrijednost jačine struje. Time se postiže jednaka brzina izgaranja elektrode bezobzira na manje promjene vrijednosti napona. Kod mokrog zavarivanja ovi izvori se obično modificiraju tako da je iznos napona strujnog kruga povišen na najveću dopustivu vrijednost, a da se pritom zadrži strmopadajuća karakteristika. Na slici 21. prikazan je dijagram strmopadajuće karakteristike struje.

Oprema za zavarivanje mora zadovoljiti sve sigurnosne aspekte, a ronioncu se moraju omogućiti što je moguće bolji radni uvjeti zbog ograničenog vremena boravka pod vodom te ekonomičnosti samoga rada. Potrebno je redovito održavati opremu i to prema određenom planu kako bi joj se produžio radni vijek trajanja te osigurala ispravnost u realnim uvjetima. [16]



Slika 21. Strmopadajuća karakteristika struje [11]

U određenim situacijama koristi se dodatna pomoćna oprema poput sistema za stabilizaciju zavarivača (košare, platforme, magneti....), posebnih naprava za pridržavanje ili centriranje radnog komada te u slučaju veoma niskih temperatura grijana odjela.

Ovisno o temperaturi preporuča se slijedeći odabir [3]:

- 30 do 20 C° - suho odijelo bez pododijela
- 20 do 15 C° - suho odijelo sa pododijelom
- 15 do 5 C° - suho odijelo sa debelim pododijelom
- niže od 5 C° - odijelo sa grijanjem

Niske temperature osim što uzrokuju ubrzano odvođenje topline sa mjesta zavara mogu i uzrokovati kvarove na uređajima za dobavu zraka uslijed zamrzavanja regulatora za disanje. [11]

2.3. Zavarljivost

Pod zavarljivošću podrazumijeva se dobivanje homogenih zavarenih spojeva prihvatljivih mehaničkih i ostalih svojstava primjenom uobičajene ili specijalne tehnologije zavarivanja.[12] Problemu zavarljivosti može se pristupiti s raznih stajališta: metalurškog, konstrukcijskog i izvedbenog. Metalurška zavarljivost čelika se često izražava ekvivalentom ugljika koji se dobije izračunavanjem po određenim formulama, pri čemu svi kemijski elementi koji čine kemijski sastav čelika u različitim udjelima utječu na njegov iznos. Ekvivalent ugljika dodatnog metala ne smije biti niži od ekvivalenta ugljika osnovnog metala. Mogućnost zavarivanja nekog osnovnog metala mokrim ručnim elektrolučnim zavarivanjem određuje se prema njegovom CE - ekvivalentu ugljika.

Prema "specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6" izraz za izračunavanje ekvivalenta ugljika glasi:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15} \quad (3)$$

Konstrukcijski čelici sa udjelom ugljika nižim od 0.1%C i čelici sa nižim ekvivalentom ugljika od 0.4% podobni su za mokro zavarivanje. Čelici sa višim ekvivalentom ugljika od 0.4% osjetljivi su na pojavu hladnih pukotina te se mogu zavarivati samo sa posebnim elektrodama (austenitne nehrđajuće i Ni-elektrode) i tehnikama rada. Mogućnost nastajanja hladnih pukotina može se smanjiti korištenjem tehnike njihanja elektrode i dodatnim

prolazima u svrhu toplinske obrade zavarenih spojeva. Ako se provodi toplinska obrada zavara bitno je da je interval između 2 prolaza bude kraći od minute.

Dokazano je da se kombiniranjem njihanja elektrode i zavarivanja u više prolaza može bitno poboljšati mehanička svojstva zavarenih spojeva smanjenjem tvrdoće, a povišenjem čvrstoće. Ovime se smanjuje i mogućnost nastajanja hladnih pukotina jer se svakim novim prolazom prethodni sloj zavarenog spoja toplinski obradi. Za ovu svrhu preporuča se korištenje elektroda manjih promjera zbog bolje kontrole nad talinom. Uslijed velike brzine hlađenja, koja izaziva visoku tvrdoću i nisku čvrstoću zavara, veliki problem kod mokrog zavarivanja predstavlja i porozitet. Absorpcija plinova u talini zavara ovisi o okolnom tlaku i temperaturi. Što je viši okolni tlak i temperatura više plinova bit će absorbirano u metalu zavara. Zbog velike brzine hlađenja absorbirani plinovi neće stići difundirati iz taline zavara te će nastali zavareni spoj biti porozan. Povišenjem dubine na kojoj se zavarivanje odvija raste i učestalost nastanka poroziteta. [11]

2.4. Primjena mokrog podvodnog zavarivanja

Primjena mokrog podvodnog zavarivanja je izrazita kod reparatura oštećenja ili rekonstrukcija podvodnih postrojenja. Moguće je vrlo brzo reagirati s obzirom na relativno malu količinu opreme i broj ljudi. Dosad je zabilježeno više stotina sanacija pukotina ili rekonstrukcija kod kojih je korišteno mokro podvodno zavarivanje. U proteklih 10-ak godina, status tehnike mokrog podvodnog zavarivanja u svijetu se znatno poboljšao. Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja je opće prihvaćena i višestruko upotrebljavana pri održavanju plovnih objekata i “off-shore” postrojenja. [12]

Mokro podvodno zavarivanje najčešće se primjenjuje kod [12]:

- “off-shore” objekata - platformi [Slika 22.] i cjevovoda [Slika 23.]
- energetskih postrojenja- nuklearne i konvencionalne elektrane
- brana i mostova - nosači, konstrukcijski elementi
- vodoopskrbe - cjevovodi, bazeni, crpne stanice
- brodova - kormilo, trup, spremnici, konstrukcijske preinake, brodski propeleri [Slika 24.]
- industrijskih postrojenja - izmjenjivači topline, razni spremnici
- podmornica - trup, kormila smjera i dubine
- korozijske zaštite - izmjena žrtvovanih anoda [Slika 25.]



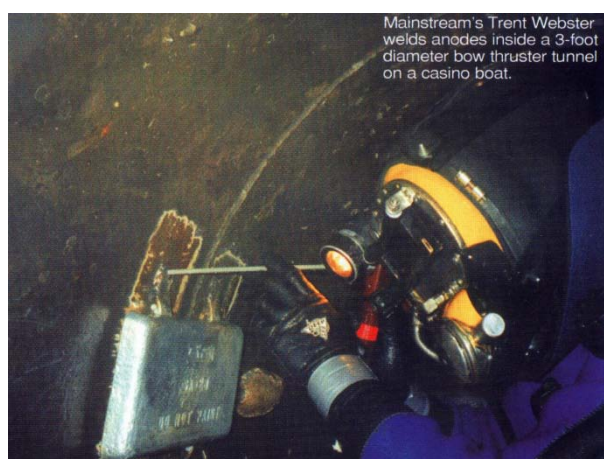
Slika 22. Reparatura nosača platforme [17]



Slika 23. Zavarivanje prirubnice cijevi [17]



Slika 24. Zavarivanje propelera broda [17]



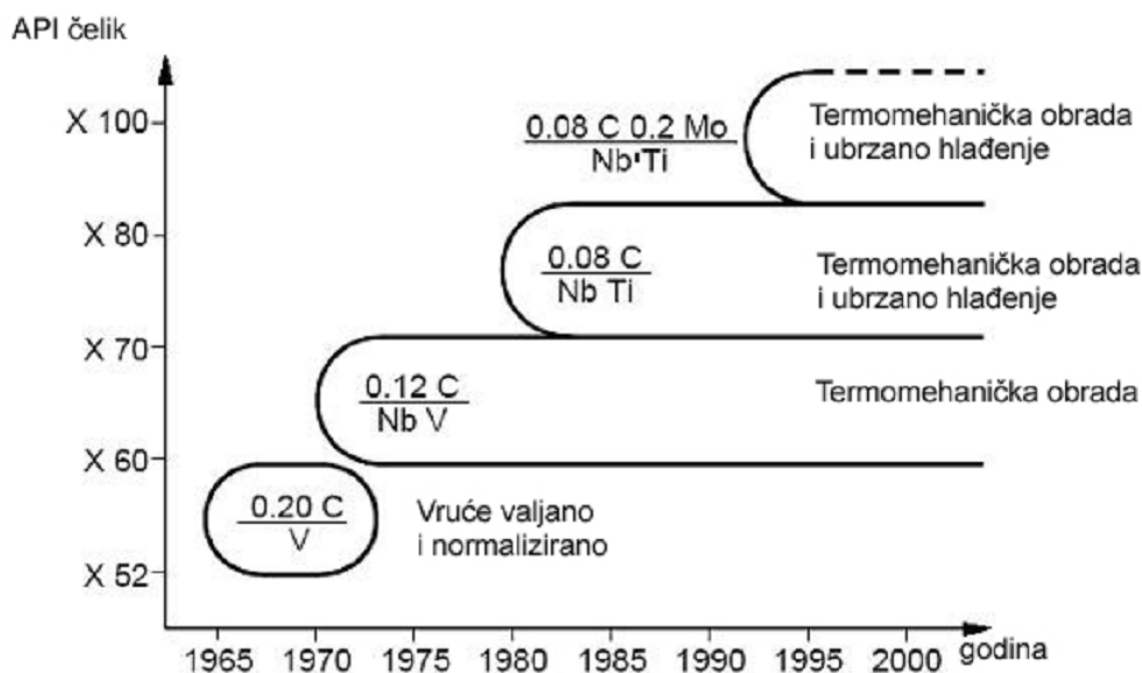
Slika 25. Izmjena žrtvovanih anoda [17]

2.5. Klasifikacija podvodnih zavara prema AWS D3.6

Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje skupljene su u "specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6", koja uzima u obzir čimbenike podvodnog okruženja. Prema AWS D3.6 postoje četiri klase zavarenih spojeva koje se označavaju slovima: A, B, C i O. Zavareni spojevi klase A uspoređuju se sa zavarenim spojevima dobivenim na suhom prema vrijednostima određenih komparativnih svojstava te zahtjevima za testiranje. Ova klasa zavarenog spoja najteža je za realizaciju i prvenstveno se ostvaruje suhim tehnikama zavarivanja. Zavareni spojevi klase B namijenjeni su za manje kritične primjene, kod kojih se može dopustiti niža duktilnost, veliki porozitet i visok stupanj diskontinuiteta. Klasa C označava zavarene spojeve koji se primjenjuju tamo gdje stupanj opterećenja nije primaran. Svi zavareni spojevi koji moraju zadovoljiti zahtjeve neke druge norme ili specifikacije spadaju u klasu O. Specifikacija AWS D3.6 u pravilu se dopunjava, popravlja te preuređuje svakih 5 godina kako bi se aktualizirala sa modernim tehnologijama. Jedan od osnovnih čimbenika za postizanje odgovarajuće kvalitete zavarenih spojeva jest pravilan odabir ronioca-zavarivača. Oni moraju biti vješti ronionci sa dobro uvježbanom tehnikom zavarivanja. Loša tehnika uzrokuje pojavu grešaka u zavarenim spojevima poput poroziteta ili povišenog udjela vodika u zavaru, a nepravilan nagib elektrode može izazvati uključenje troske u sam zavareni spoj. Osim odlične tehnike zavarivanja i vještine ronjenja potrebna je i visoka fizička sprema zavarivača. Iskustvo je pokazalo da zavarivači s odličnom fizičkom spremom mogu raditi pod vodom bez pauze maksimalno 4 sata. Duži rad od toga uzrokuje greške kod zavarivača uslijed nastalog umora. Kako bi se osigurala jedinstvena edukacija za sve ronioce-zavarivače diljem svijeta i u Europi razvili su se standardi za njihovu obuku i certificiranje.[4]

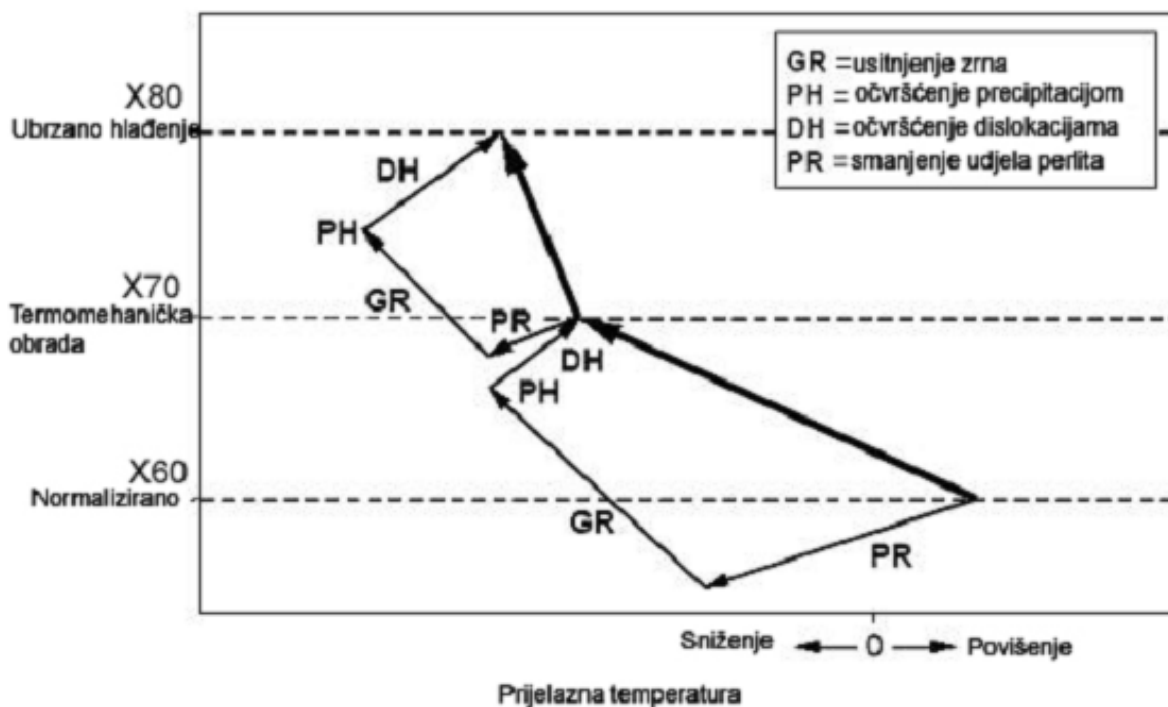
3. Razvoj i primjena čelika visoke čvrstoće API 5L X80

Kao materijal za izradu cjevovoda za prijevoz nafte i plina danas se najčešće koriste čelici gradacije X70 i X80 prema specifikaciji za cjevovode API 5L. Cjevovodi velikih promjera danas transportiraju 75% svjetske proizvodnje prirodnog plina i to na najekonomičniji i najsigurniji način. Smanjenjem udjela ugljika ispod 0,1%, mikrolegiranjem s Al, Nb i V te pravilnom toplinskom obradom postiže se fina sitnozrnata struktura odličnih mehaničkih svojstava. Razvojem mikrolegiranja te unapređenjem termomehaničke obrade uz ubrzano hlađenje dobiveni su čelici gradacije X80 povećane čvrstoće. Na slici 26. prikazan je razvoj čelika visoke čvrstoće tijekom prošlog stoljeća. [13]



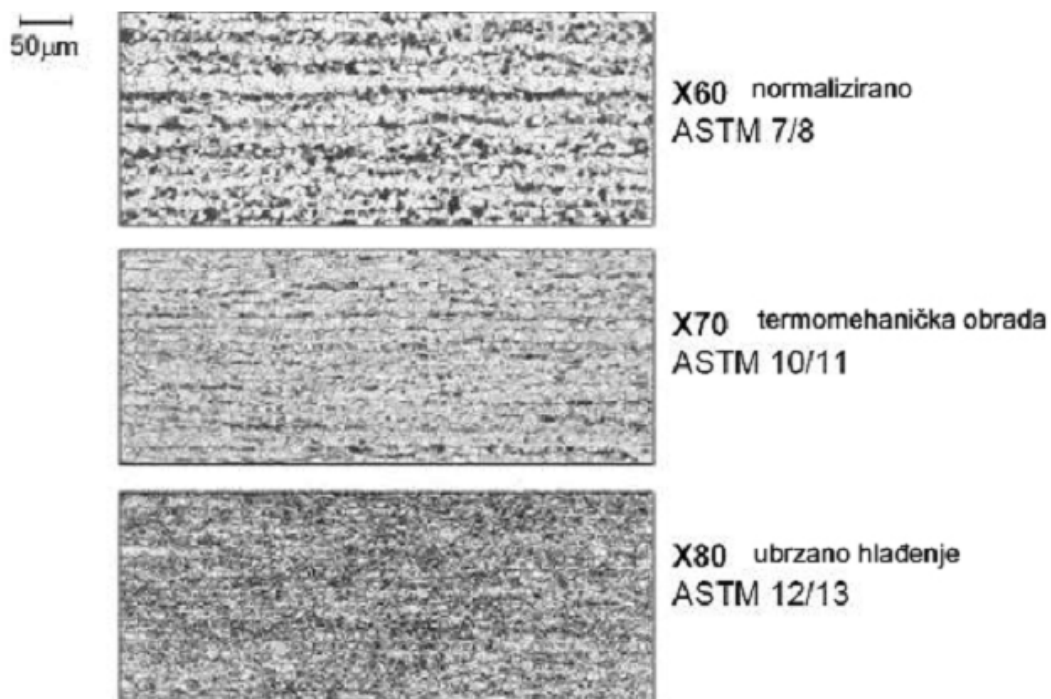
Slika 26. Razvoj čelika visoke čvrstoće [13]

Mehanička svojstva čelika određena su mikrostrukturnim značajkama poput granica zrna, precipitata i dislokacija. Kod niskolegiranih čelika se navedeni mehanizmi odvijaju tijekom transformacije austenita pri hlađenju, na što se utječe brzinom hlađenja i završnom temperaturom hlađenja. Na slici 27 prikazano je kako se spomenutim mehanizmima očvršćivanja dobijaju čelici gradacije X60, X70 i X80. [13]



Slika 27. Mehanizmi očvršćivanja za čelike X60, X70 i X80 [13]

Čelici gradacije X60 su normalizirani i uobičajeno sadrže 0,2% ugljika, 1,55% vanadija, 0,03% niobija i 0,02% dušika. Kod čelika X70 udio ugljika smanjen je na 0,12% i manje, ali je primjenjena termomehanička obrada što je rezultiralo smanjenjem feritnog zrna. Usitnjavanjem zrna istovremeno se povećava čvrstoća i snižava prijelazna temperatura. Gubitak čvrstoće nastao redukcijom perlita nadomješten je precipitacijskim očvršćavanjem i dislokacijama. Daljnji razvoj prema gradaciji X80 dobiven je isključivo promjenom feritno-perlitne strukture u feritno-bainitnu. Kod čelika X80 još je više smanjen udio ugljika, usitnjeno je zrno te je povećana gustoća dislokacija. Na slici 28 prikazane su karakteristične mikrostrukture X60, X70 i X80 čelika. [13]



Slika 28. Tipične mikorstrukture čelika X60,X70 i X80 [13]

Iako se čelici klase X80 smatraju dobro zavarljivima u normalnim uvjetima, pri mokrom podvodnom zavarivanju uz ubrzano hlađenje cilj je dobiti mikrostrukture koje imaju veću otpornost na pojavu i propagaciju pukotina, stoga je nužno razviti adekvatne tehnologije zavarivanja i dodatne materijale. [13]

4. Eksperimentalni dio

4.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Pri planiranju pokusa, oblikovan je koncept od izrade uzoraka strojnom obradom, podvodnog navarivanja pa do ispitivanja navarenih uzoraka.

Cilj eksperimenta jest utvrditi utjecaj unosa toplina na mikrostrukturu API 5L X80 čelika te za odgovarajući dodatni materijal odrediti optimalne parametre i tehiku rada za REL postupak zavarivanja. Za usporedbu rezultata ispitivanja tvrdoće i dobivene mikrostrukture navarivanje je provedeno i na konstrukcijskom čeliku S235.

Mokro podvodno navarivanje provedeno je u laboratorijskim uvjetima u malom bazenu (Slika 29.) dimenzija 1100 x 60 x 750 mm, zapremnine 500 litara. Navarivanje svih uzoraka provedeno je na dubini od 250 mm, u slatkoj vodi iz gradske opskrbe, temperature 20 do 25 °C, uz temperaturu zraka od 22 do 30 °C.



Slika 29. Bazen u kojem se odvijao pokus

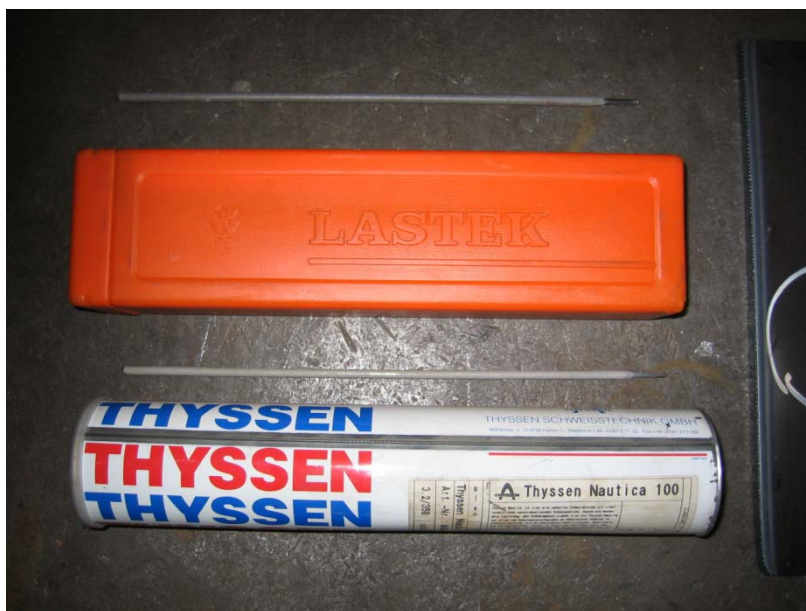
Uzorci za navarivanje izrađeni su iz ploča osnovnog materijala čelika visoke čvrstoće API 5L X80 te konstrukcijskog čelika S235. Svi uzorci izrezani su plinskim postupkom iz ploča na zadane dimenzije 150 x 25 x 10 mm, kao što je prikazano na slici 28.

Pritom se koristio neutralni plamen (omjer kisika i acetilena 1:1). Ukupno je izrezano i navareno 16 uzoraka, 8 iz osnovnog materijala X80 čelika, te 8 iz S235 čelika.



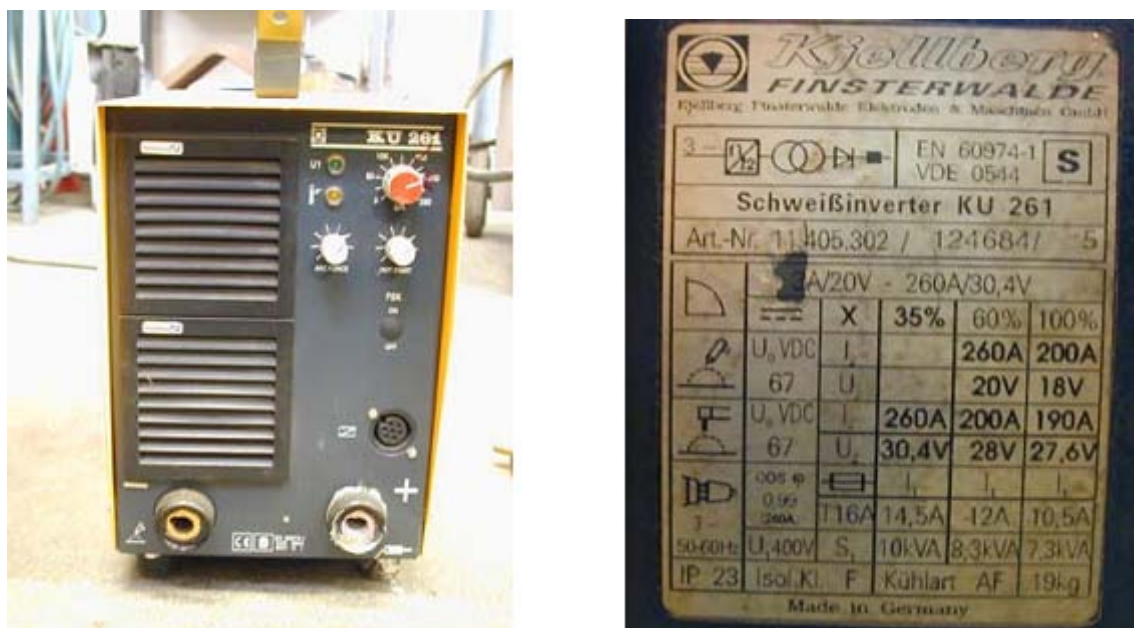
Slika 30. Uzorci napravljeni od API 5L X80 čelika

Kao dodatni materijal koristile su se Thyssen Nautica elektrode promjera Ø3,2 mm te Lastek elektrode promjera Ø4 mm [Slika 31.].



Slika 31. Prikaz Thyssen Nautica i Lastek elektrode

Na slici 32 prikazan je izvor struje koji se koristio u eksperimentu te njegove karakteristike.



Slika 32. Izvor struje za zavarivanje te njegove karakteristike

4.2. Osnovni materijali

Na idućim tablicama prikazani su kemijski sastavi čelika povišene čvrstoće API 5L X80 i konstrukcijskog čelika S235, na kojim se izvodilo navarivanje.

Tablica 1. Kemijski sastav API 5L X80 čelika [18]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	S	B	V	Cu
Maseni udio %	0,064	0,33	1,94	0,015	0,17	0,018	0,002	0,014	0,063	0,0006	0,0002	0,001	0,003

Tablica 2. Kemijski sastav S235 čelika prema EN 10025 : 2004 [19]

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Ni
Maseni udio %	0,17	1,4	0,035	0,035	-	-	0,55	0,012

Prema normi API 5L za čelike s manje od 0,12% ugljika ekvivalent ugljika se izračunava prema Itto-Bessyo formuli:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B, [13]$$

pri čemu P_{cm} ne smije biti veći od 0,25%.

Za šaržu čelika X80 primjenjenu na ovom eksperimentu P_{cm} iznosi **0,1834**.

Ako analiziramo zavarljivost čelika X80 prema izrazu iz "Specifikacije za podvodno zavarivanje AWS D3.6M: 1990", koji glasi:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni+Cu)}{15}, [13]$$

Dobit ćemo $CE=0,423$. Prema navedenoj specifikaciji materijali sa $CE > 0,4$ smatraju se neprikladnim za podvodno zavarivanje. Zbog sve veće primjene ovog čelika pri izgradnji podvodnih cjevovoda i struktura potrebno je razviti odgovarajuću tehnologiju zavarivanja kojom će se moći osigurati adekvatna mehanička svojstva zavarenih spojeva te se kompenzirati specifičnosti osnovnog materijala.

4.3. Parametri navarivanja u eksperimentu

Parametri za navarivanje izračunati su prema idućim formulama:

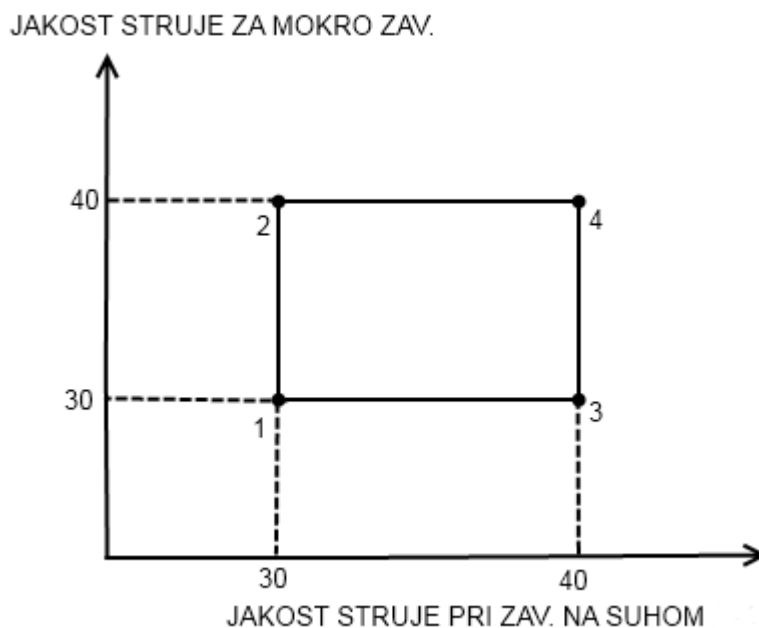
a) JAKINA STRUJE: $I_{suh0} = d_{el} \times (30 \div 40) \text{ (A)}, [12]$

$$I_{mokro} = I_{suh0} \times (30 \div 40) \text{ (A)}, [12]$$

pri čemu su: I_{suh0} – jakost struje za zavarivanje pri normalnim suhim uvjetima, A

d_{el} – promjer elektrode, mm

I_{mokro} – jakost struje pri mokrom podvodnom zavarivanju, A



Slika 33. Dijagram za određivanje jačine struje

Prema gornjem dijagramu određena su 4 parametra jačine struje koja su se koristila pri navarivanju uzoraka.

b) NAPON STRUJE: $U = 20 + 0,04 \times I_{\text{mokro}}$ (V), [12]

pri čemu je: U – napon, V

c) UNOS TOPLINE: $Q = \frac{U \times I_{\text{mokro}} \times \eta_{\text{REL}} \times 60}{v_{\text{zav}} \times 1000}$ (kJ/cm), [12]

pri čemu su: U – napon zavarivanja, V

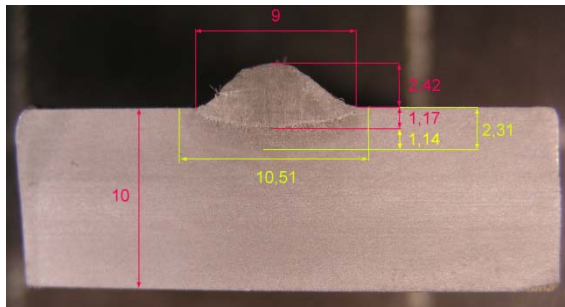
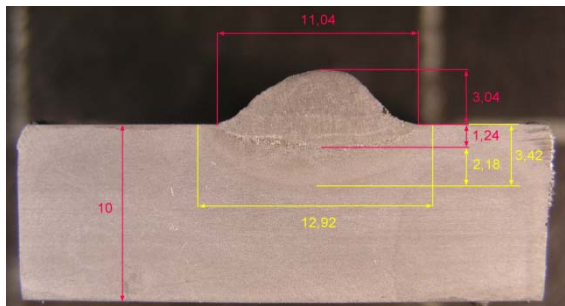
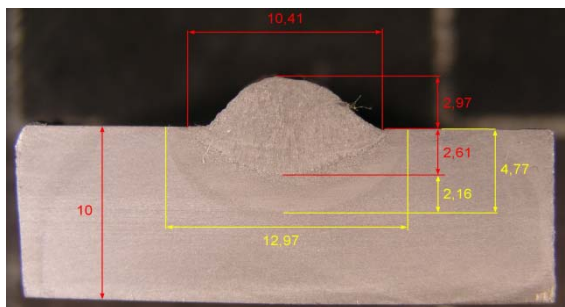
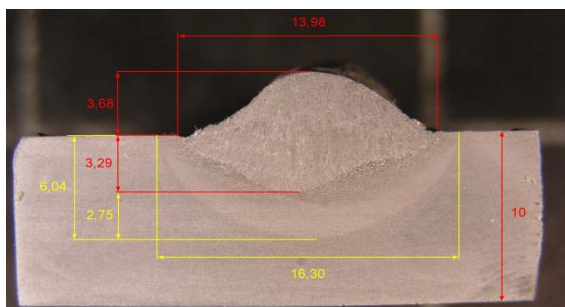
I_{mokro} – jAKOST struje pri mokrom podvodnom zavarivanju

η_{REL} – stupanj iskorištenja zavarivanja, za REL postupak iznosi 0,8

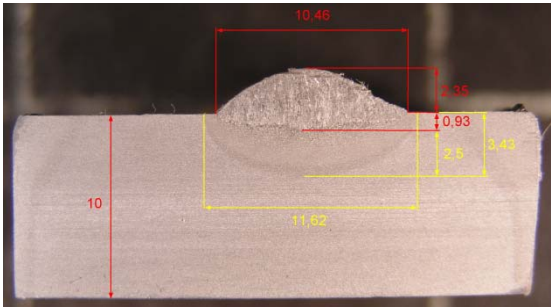
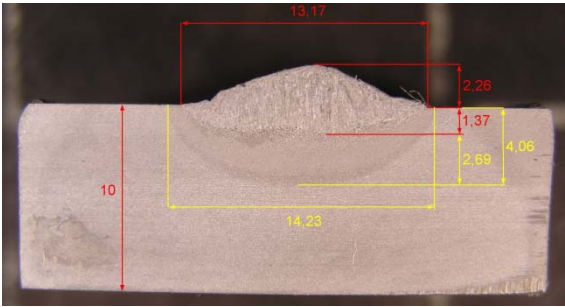
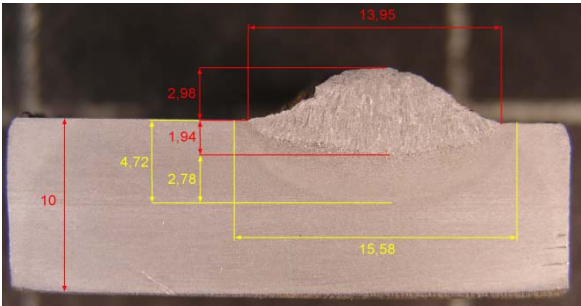
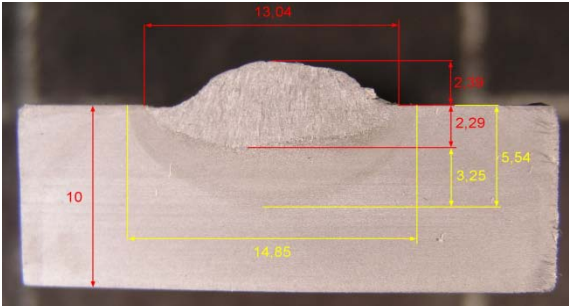
v_{zav} – brzina zavarivanja, mm/s

Nakon navarivanja iz svakog uzorka izrezan je kružnom pilom makroizbrusak za mjerenje tvrdoće i analizu mikrostrukture. Na idućim tablicama redom su prikazane dobivene geometrije navarenih spojeva s pripadajućim parametrima navarivanja.

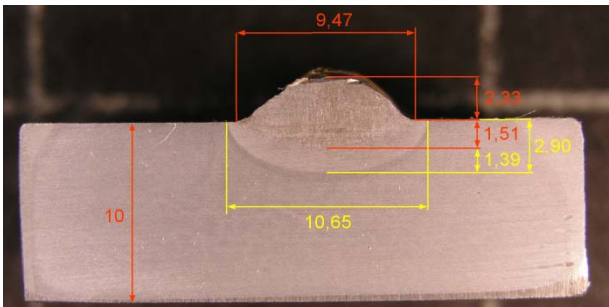
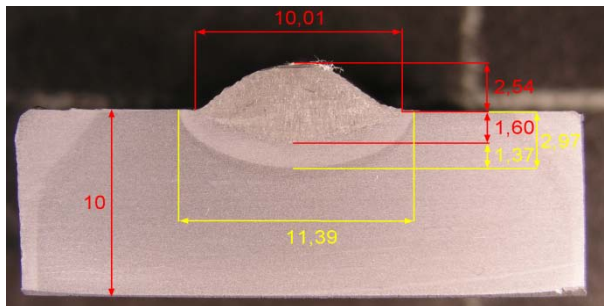
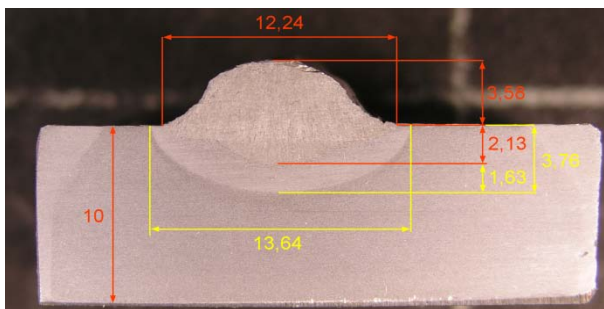
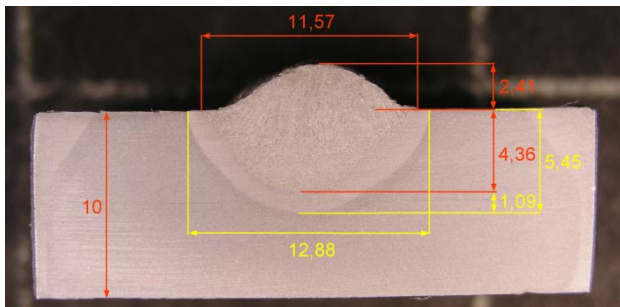
Tablica 3. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (API 5L X80 čelik, Thyssen Nautica elektroda)

Uzorak	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	q (kJ/cm)	Geometrija navara
1.	130	26	13,64	11,89	
2.	140	28	14,67	12,83	
3.	160	31	15,75	15,12	
4.	180	33	14,57	19,57	

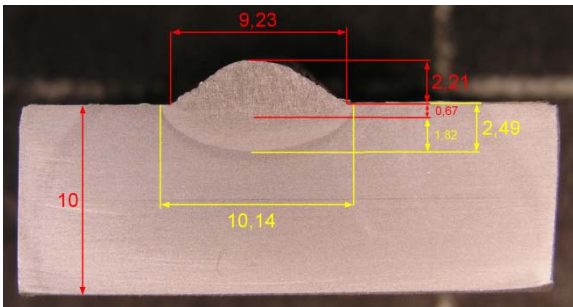
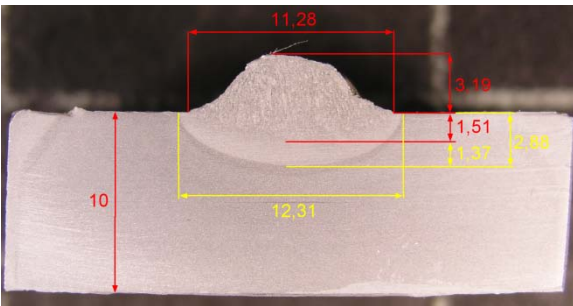
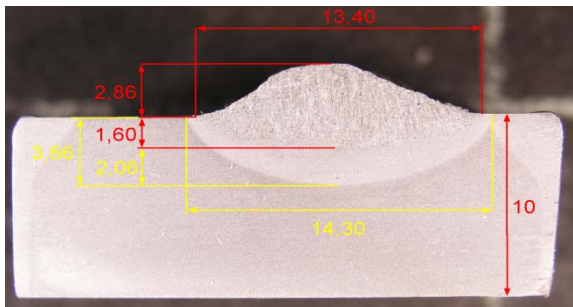
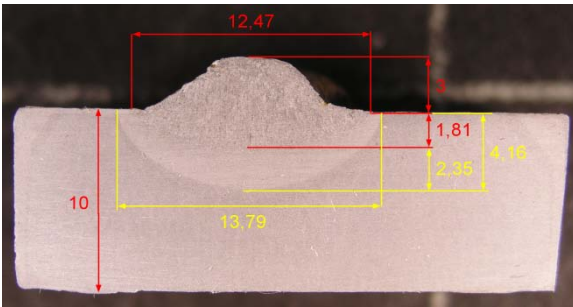
Tablica 4. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)

Uzorak	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	q (kJ/cm)	Geometrija navara
5.	160	26	15,58	12,82	
6.	170	28	16,2	14,01	
7.	210	29	15	19,49	
8.	225	30	16	20,25	

Tablica 5. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (S235 čelika Thyssen Naustica elektroda)

Uzorak	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	q (kJ/cm)	Geometrija navara
9.	130	27	16,96	9,93	
10.	140	28	16,6	11,34	
11.	160	29	15	14,84	
12.	180	34	15,79	18,6	

Tablica 6. Prikaz parametara navarivanja te geometrije navarenih spojeva (S235 čelik, Lastek elektroda)

Uzorak	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	q (kJ/cm)	Geometrija navara
13.	160	26	14,42	13,85	
14.	170	28	14,72	15,52	
15.	210	29	16,6	17,61	
16.	225	30	16,6	19,52	

Iz priloženih tablica jasno je prikazan utjecaj unos topline na geometriju navarenog spoja. Porastom unosa topline povećava se penetracija, nadvišenje i širina zavora te zona utjecaja topline. Zavisno o uvjetima zavarivanja (dubina, pozicija) potrebno je u praksi odrediti optimalne parametre kako bi se u što kraćem vremenu dobio zavareni spoj odgovarajuće kvalitete.

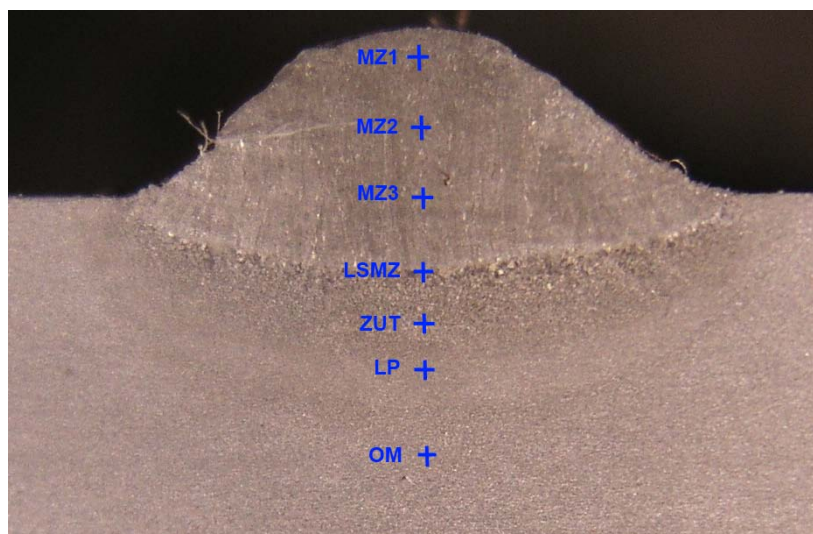
4.4. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća HV10 se vrlo često uzima kao kontrolni faktor u procijeni zavarljivosti materijala posebno u slučaju mokrog podvodnog zavarivanja. Priprema površine za mjerenje tvrdoća makroizbrusaka sastojala se od brušenja na brusnom papiru s granulacijom 600 te naknadnog nagrivanja u otopini NITALA sa 7% HNO_3 . Makroizbrusci su držani u otopini u trajanju od 20 sekundi te su zatim ispirani vodom. Mjerenje tvrdoće provedeno je na Reicherter tvrdomjeru koji je prikazan na slici 34.



Slika 34. Tvrdomjer

Tvrdoća svakog od makoizbrusaka izmjerena je na 7 pozicija kako je prikazano na slici 35.



Slika 35. Prikaz pozicija mjerenja tvrdoće

7 pozicija sa gornje slike su: MZ1- metal zavora 1 (najbliži površini lica zavora)

MZ2 - metal zavora 2

MZ3 - metal zavora 3

LSMZ - linija staljivanja metala zavora

ZUT - zona utjecaja topline

LP- linija prijelaza između ZUT-a i osnovnog materijala

OM - osnovni materijal

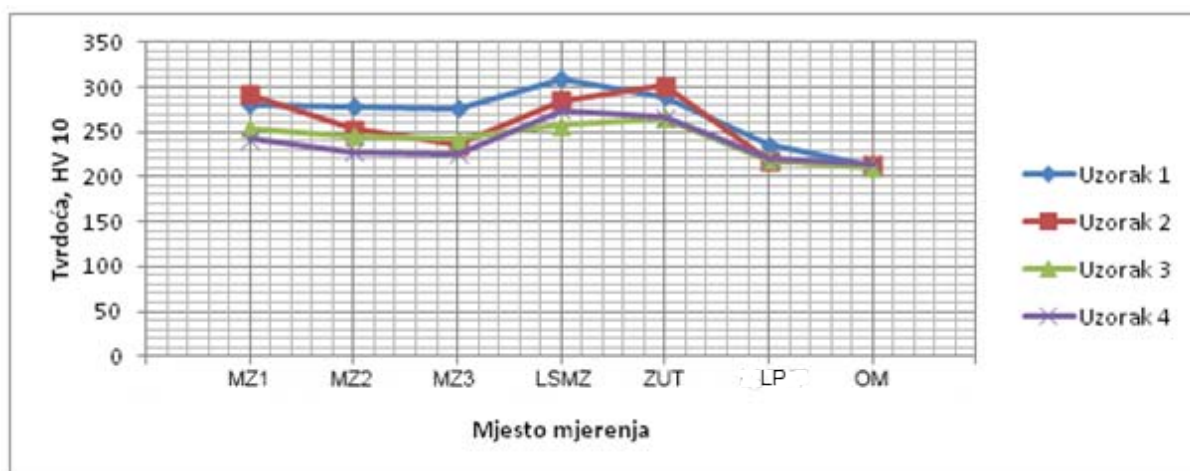
Na svakom od 16 uzoraka načinjeno je 7 mjerenja što ukupno čini 112 mjernih točaka.

Na tablici 7 prikazane su vrijednosti maksimalnih izmjerenih tvrdoća HV10 pri zavarivanju X80 čelika Thyseen Nautica elektrodom.

Tablica 7. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju X80 čelika Thyseen Nautica elektrodom

Uzorak	Unos topline (kJ/cm)	Maksimalna tvrdoća	Pozicija
1.	11,89	309	LSMZ
2.	12,83	302	ZUT
3.	15,12	265	ZUT
4.	19,57	274	ZUT

Na slici 36 prikazani su profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća.



Slika 36. Dijagram izmjerenih tvrdoća 1,2,3 i 4. uzorka (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda)

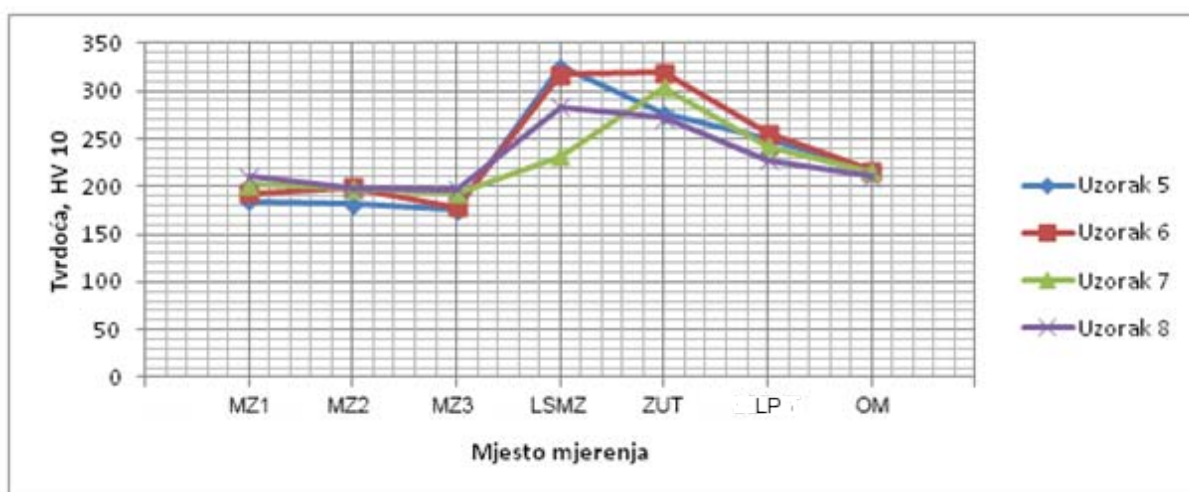
Maksimalna izmjerena tvrdoća iznosi 309HV10 što je za API 5L X80 čelik čiji CE iznosi 0,423 relativno niska vrijednost. Podjetimo se, za čelike sa Ce od 0,36 do 0,4 izmjerene maksimalne tvrdoće u ZUT-u iznose od 350 do 410HV10. Prema profilima sa slike 36 vidljivo je da porastom unosa topline tvrdoće dobivenih navarenih spojeva padaju. Dakle, povišenjem unosa topline navareni spojevi imati će veću žilavost, što je kod nosivih konstrukcija najvažnija karakteristika. Najviša tvrdoća za sva 4 uzorka izmjerena je na liniji staljivanja ZUT-a i u samom ZUT-u. Iz navedenog se da zaključiti da najveći utjecaj na tu zakonitost ponašanja imaju legirni elementi.

Na tablici 8 prikazane su vrijednosti maksimalnih izmjerenih tvrdoća HV10 pri zavarivanju X80 čelika Lastek elektrodom.

Tablica 8. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju X80 čelika Lastek elektrodom

Uzorak	Unos topline (kJ/cm)	Maksimalana tvrdoća	Pozicija
5.	12,82	325	LSMZ
6.	14,01	319	ZUT
7.	19,49	304	ZUT
8.	20,25	283	LSMZ

Na slici 37 prikazani su profili izmjerenih tvrdoća.



Slika 37. Dijagram izmjerenih tvrdoća 5, 6, 7 i 8. uzorka (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)

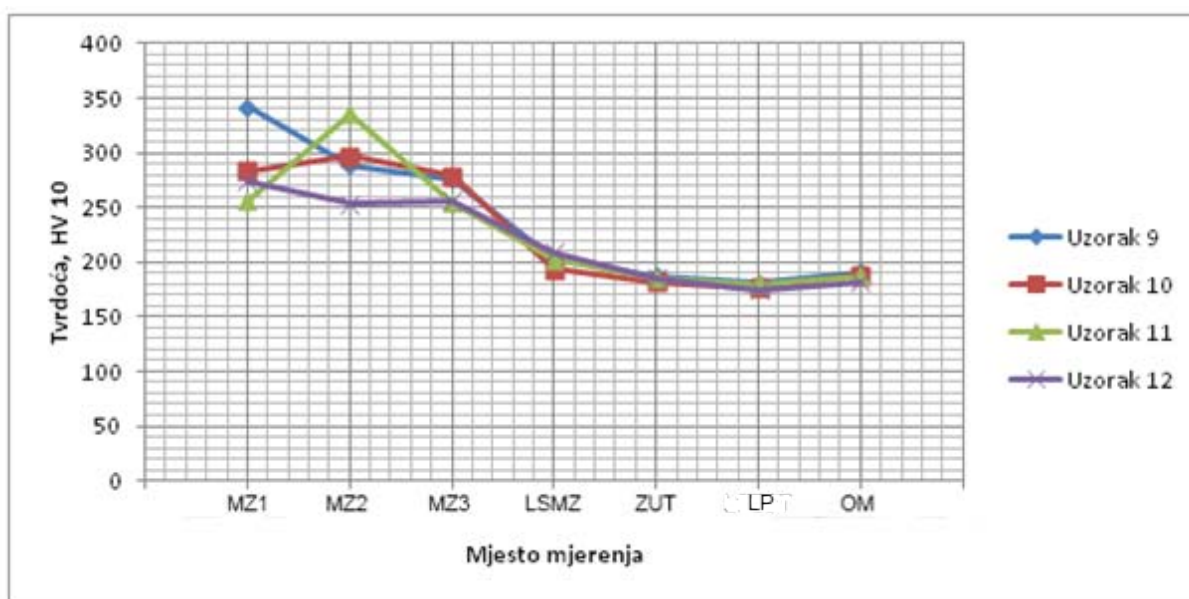
Najviša izmjerena tvrdoća iznosi 325HV10 u LSMZ što je prihvatljiva vrijednost. Iako je pri navariavnju Lastek Ø4 mm elektrodom bio veći unos topline nego kod Thyseen Nautice Ø3,2 mm elektrode izmjerene tvrdoće 5, 6, 7, i 8. uzorka su više nego kod 1, 2, 3 i 4. uzorka. Ovo može biti rezultat utjecaja većeg promjera Lastek elektrode koji za stabilan proces zavarivanja zahtjeva veći unos topline koji je uzrokovao intenzivnije hlađenje taline navara. Također je moguće utvrditi da je API 5L X80 čelik kompatibilniji za zavarivanje Thyseen Nautica elektrodom u pogledu kemijskog sastava.

Na tablici 9 prikazane su vrijednosti maksimalnih izmjerenih tvrdoća HV10 pri zavarivanju S235 čelika Thyseen Nautica elektrodom.

Tablica 9. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju S235 čelika Thyseen Nautica elektrodom

Uzorak	Unos topline (kJ/cm)	Maksimalna tvrdoća	Pozicija
9.	9,93	342	MZ1
10.	11,34	297	MZ2
11.	14,84	336	MZ2
12.	18,6	274	MZ1

Na slici 38 prikazani su profili izmjerenih tvrdoća.



Slika 38. Dijagram izmjerenih tvrdoća 9, 10, 11 i 12. uzorka (S235 čelik, Thyseen Nautica elektroda)

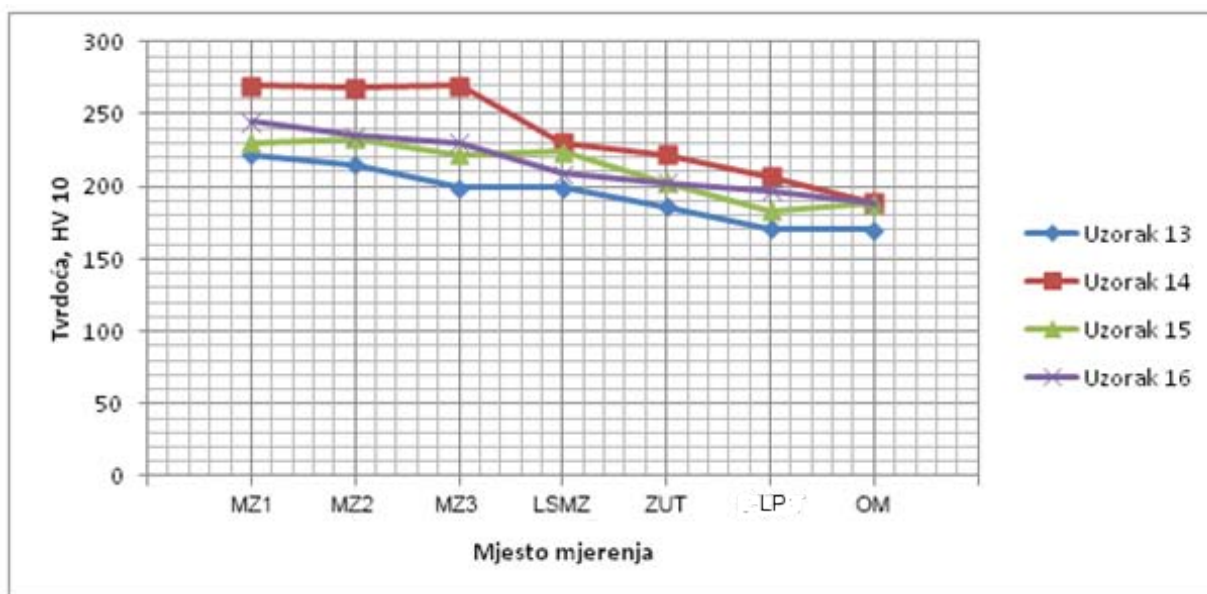
Prema kemijskom sastavu S235 čelika iz norme EN 10025 : 2004, ekvivalent ugljika za ovaj čelik iznosi oko 0,44 što spada u čelike koji nisu preporučljivi za podvodno zavarivanje. Najviša izmjerena tvrdoća iznosi 342HV10 u MZ1 što je očekivana vrijednost za čelike sa CE iznad 0,4. Profili tvrdoća kod zavarivanja S235 čelika pokazuju postepeni pad tvrdoće od metala zavora prema osnovnom materijalu. Također se može zaključiti da su porastom unosa topline tvrdoće navarenih spojeva padale. Ovo je najviše vidljivo u području metala zavora.

Na tablici 10 prikazane su vrijednosti maksimalnih izmjerenih tvrdoća HV10 pri zavarivanju S235 čelika Lastek elektrodom.

Tablica 10. Maksimalne vrijednosti tvrdoće HV10 pri zavarivanju S235 čelika Thyseen Nautica elektrodom

Uzorak	Unos topline (kJ/cm)	Maksimalna tvrdoća	Pozicija
13.	13,85	222	MZ1
14.	15,52	270	MZ1
15.	17,61	233	MZ2
16.	19,52	238	MZ1

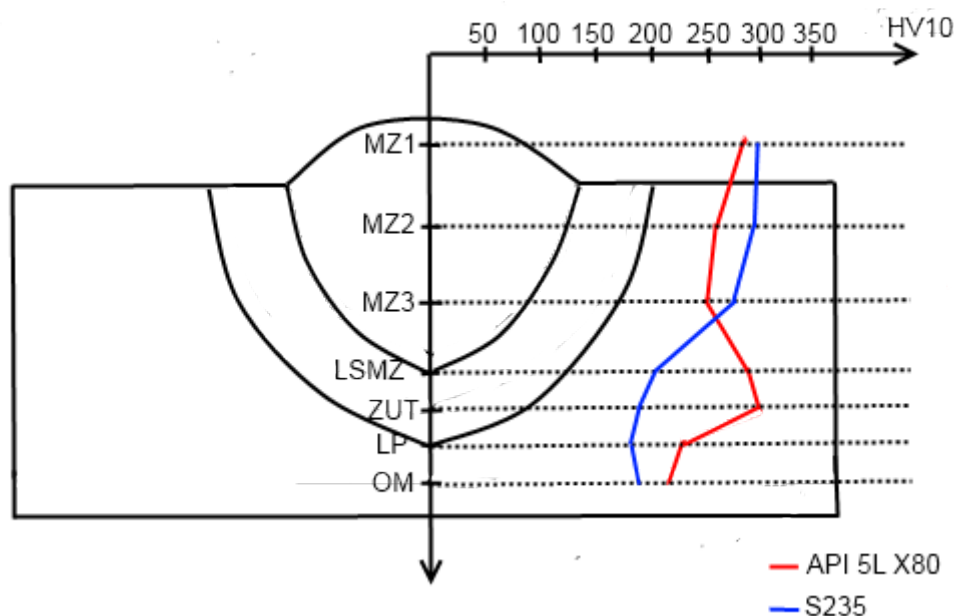
Na slici 40 prikazani su profili izmjerenih tvrdoća.



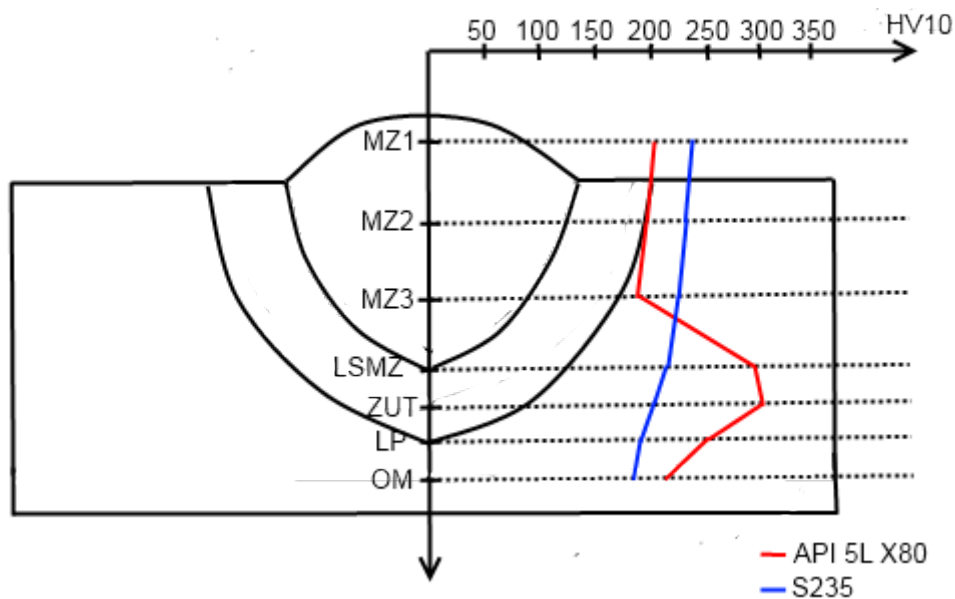
Slika 39. Dijagram izmjerenih tvrdoća 13, 14, 15 i 16. uzorka (S235 čelik, Lastek elektroda)

Maksimalna izmjerena tvrdoća iznosila je 270 HV10 u području metala zava uzorka 14. Izmjerene tvrdoće svih uzoraka S235 čelika pri zavarivanju Lastek elektrodom bile su niže nego korištenjem Thyseen Nautica elektrode. Dakle, podvodnim navarivanjem na S235 čeliku Lastek elektrodom postignuti su navareni spojevi sa boljim vrijednostima tvrdoće nego korištenjem Thyseen Nautica elektrode.

Na slici 40 prikazana je usporedba profila tvrdoća navarenih spojeva na X80 i S235 čeliku pri korištenju Thyseen Nautica elektrode, a na slici 41 prikazani su profili tvrdoća pri korištenju Lastek elektrode.



Slika 40. Usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća pri navarivanju Thyseen Nautica elektrodom



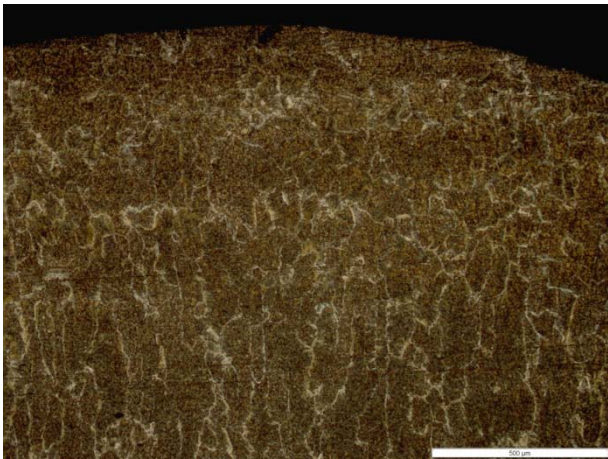
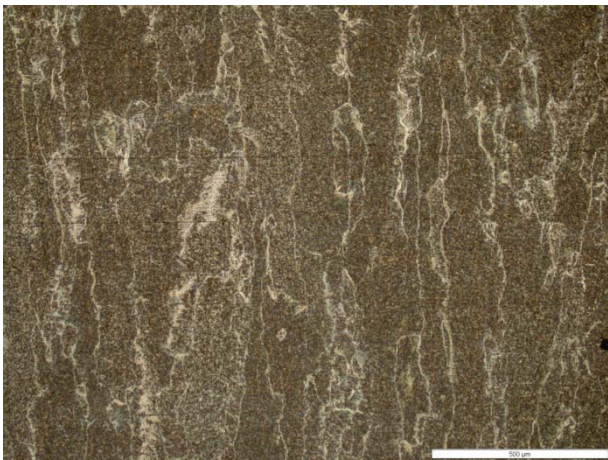
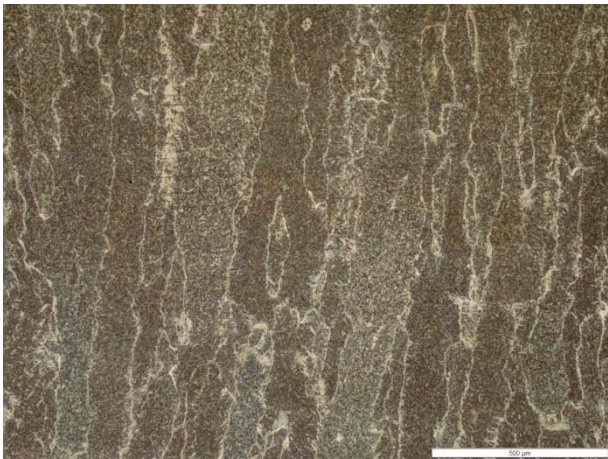
Slika 41. Usporedba srednjih vrijednosti tvrdoća pri navarivanju Lastek elektrodom

4.5. Analiza mikrostrukture

Aaliza mikrostrukture provedena je na istim makroizbruscima kao i mjerenje tvrdoće. Prije analize mikrostrukture makroizbrusci su brušeni pomoću brusnog papira od silicij-karbida (SiC). Za hlađenje se pri brušenju koristila obična voda. Granulacija korištenih papira postepeno se povećavala od 150 do 4000 granulata. Poslije brušenja makroizbrusci su bili podvrgnuti poliranju dijamantnom pastom, te pritom hlađeni lubrikantima DP-Lubricant Blue te DP-Lubricant Red. Zadnja faza pripreme za mikroanalizu sastojala se u nagrivanju makroizbrusaka u otopini etilnog alkohola sa dodatkom od 3% nitala (HNO_3), uz naknadno ispiranje u vodi. Pri jednoprolaznom mokrom podvodnom zavarivanju uobičajene su martenzitne mikrostrukture koje su osjetljive na pojavu pukotina. Širina tog martenzitnog sloja iznosi oko 0,5 mm, ovisno o unosu topline. Iz analize tvrdoće za API 5L X80 čelik pri navarivanju s obje vrste elektrode vidljivo je kako je najviša tvrdoća bila u području linije staljivanja metala zavora, točnije na udaljenosti 0,5 mm od linije staljivanja. Iz toga se da zaključiti da se širina martenzitnog pojasa kreće tik uz liniju staljivanja na udaljenosti oko 0,5 mm. Osnovni materijal ima feritno-bainitnu mikrostrukturu, sa sitnim zrnom te povećanim brojem dislokacija. U području linije staljivanja prevladava grubozrnata martenzitna struktura, dok se udaljavanjem od linije staljivanja formira martenzitno-bainitna struktura.

Na idućim tablicama prikazane su mikrostrukture nekih reprezentativnih uzoraka.

Tabela 11. Prikaz mikrostrukture uzorka 1 (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda)

Pozicija	Prikaz mikrostrukture
Metal zavara 1 (MZ1)	
Metal zavara 2 (MZ2)	
Metal zavara 3 (MZ3)	

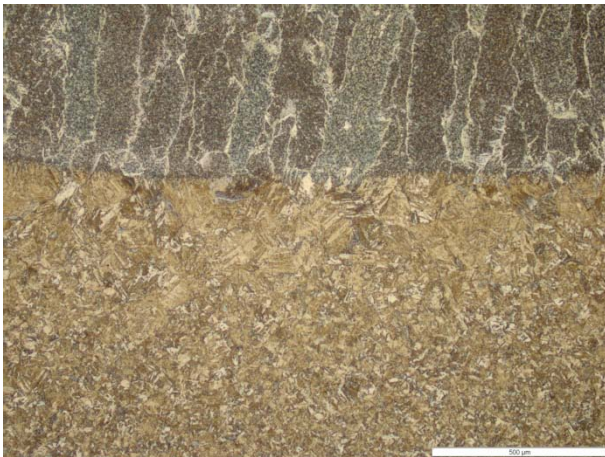
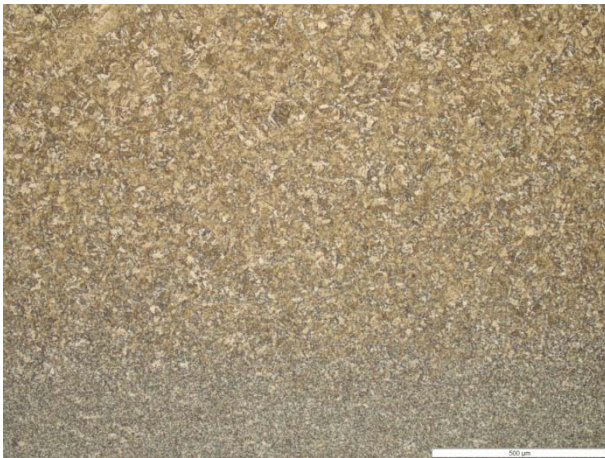

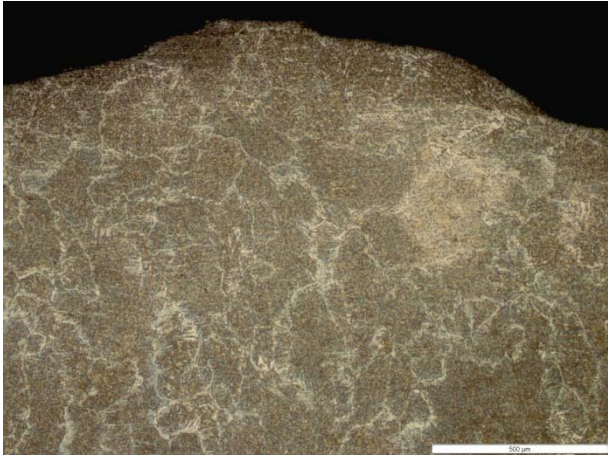


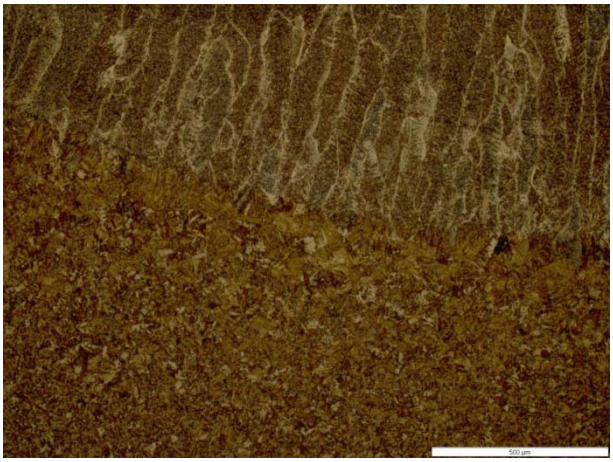
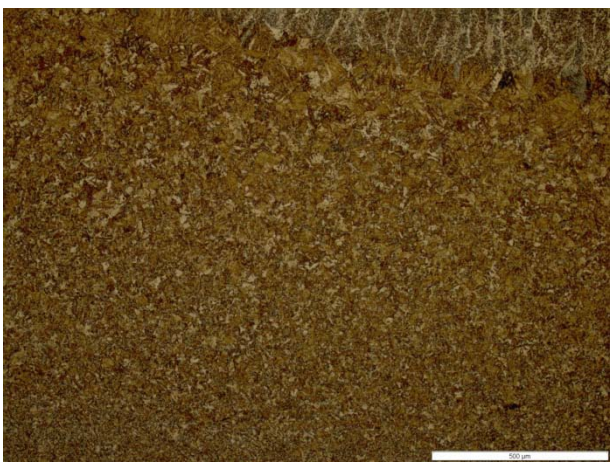




<p>Linija staljivanja metala zavara (LSMZ)</p>	 <p>500 µm</p>
<p>Zona utjecaja topline (ZUT)</p>	 <p>500 µm</p>
<p>Osnovni materijal (OM)</p>	 <p>500 µm</p>

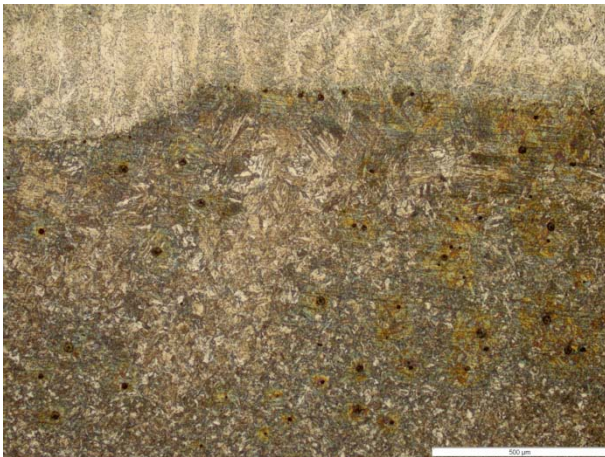
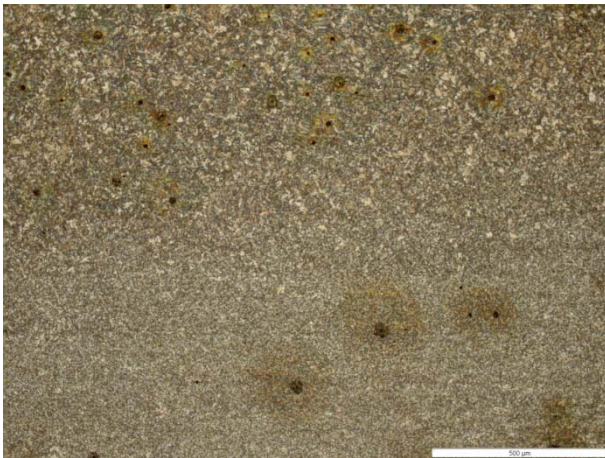
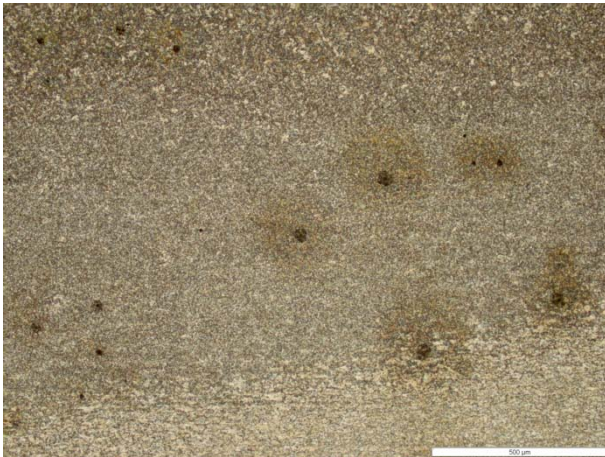
Tabela 12. Prikaz mikrostrukture uzorka 3 (API 5L X80 čelik, Thyseen Nautica elektroda)

Pozicija	Prikaz mikrostrukture
Metal zavara 1 (MZ1)	
Metal zavara 2 (MZ2)	
Metal zavara 3 (MZ3)	




<p>Linija staljivanja metala zavara (LSMZ)</p>	 <p>500 µm</p>
<p>Zona utjecaja topline (ZUT)</p>	 <p>500 µm</p>
<p>Linija prijelaza (LP) između ZUT-a i osnovnog materijala</p>	 <p>500 µm</p>




Tablica 13. Prikaz mikrostrukture uzorka 5 (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)

Pozicija	Prikaz mikrostrukture
Metal zavora 1	
Metal zavora 2	
Metal zavora 3	

<p>Linija staljivanja metala zavara (LSMZ)</p>	
<p>Zona utjecaja topline (ZUT)</p>	
<p>Linija prijelaza (LP)</p>	

Tablica 14. Prikaz mikrostrukture uzorka 6 (API 5L X80 čelik, Lastek elektroda)

Pozicija	Prikaz mikrostrukture
Metal zavara 1	
Metal zavara 2	
Metal zavara 3	

<p>Linija staljivanja metala zavara (LSMZ)</p>	 <p>500 µm</p>
<p>Zona utjecaja topline (ZUT)</p>	 <p>500 µm</p>
<p>Linija prijelaza (LP)</p>	 <p>500 µm</p>

5. Zaključak

Razvojem tehnologije, dodatnih materijala i opreme tehnika mokrog podvodnog zavarivanja postaje sve bolja alternativa za određene procedure popravaka i održavanja koje su prije bile izvedive samo suhim tehnikama zavarivanja, te se danas mokro zavarivanje prihvaća kao ozbiljan reparaturni postupak. Zbog niskih troškova rada i veće primjenjivosti u odnosu na suhe tehnike zavarivanja moguće je u budućnosti predvidjeti velika ulaganja i rad na daljnjem razvoju izvora struje za mokro zavarivanje, ronilačke opreme, elektroda, edukacije te osposobljavanju ronilaca-zavarivača. Budućnost mokrog podvodnog zavarivanja usko je povezana sa razvojem ROV-a (Remote Operated Vehicle) i AUV-a (Autonomus Underwater Vehicle). Daljinski upravljana autonomna ronilica (ROV) danas se primjenjuje kao cijeloviti inspekcijski alat, opremljen sa odgovarajućim senzorima i mjernim uređajima. Manipulatori i mogućnosti izvedbe podvodnih ispitivanja zavarenih spojeva na dubinama iznad 60 m, kao i alati za brušenje i čišćenje čine ROV nužnim sustavom za podvodno ispitivanje i ostale podvodne radove. Daljnjim razvojem tehnologije i opreme očekuje se postizanje još veće primjenjivosti mokrog podvodnog zavarivanja.

Eksperimentalni rad proveden u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pokazao je da je primjenom tehnologije mokrog podvodnog zavarivanja moguće na čeliku API 5L X80 dobiti zavareni spoj zadovoljavajućih vrijednosti tvrdoća i geometrije spoja. Mjerenjem tvrdoće HV10 na ispitnim uzorcima ustanovljeno je da su najviše vrijednosti tvrdoće bile u području zone utjecaja topline (ZUT) te na liniji staljivanja metala zavara (LSMZ). Maksimalna tvrdoća navara dobivenih primjenom Thyssen Nautica Ø3,2 mm elektrode iznosila je 309 HV10 što je za API 5L X80 čiji je ekvivalent ugljika iznosio 0,423 dosta niska vrijednost. S druge strane, primjenom Lastek Ø4 mm elektrode najviša izmjerena tvrdoća iznosila je 325 HV10. Općenito svi navareni spojevi dobiveni Lastek elektrodom imali su više vrijednosti tvrdoće. Glavni uzrok tome je vjerojatno veći promjer elektrode koji je zahtijevao viši unos topline kako bi se ostvario stabilan proces zavarivanja pod vodom. Kao tehnika rada koristila se tehnika povlačenja budući da je ona danas najčešća u primjeni. Zavareni spojevi na čelicima sa ekvivalentom ugljika od 0,36 do 0,4 pri mokrom podvodnom zavarivanju obično imaju tvrdoću između 350 i 410 HV10 što ih čini tvrdim i krhkim. Može se zaključiti da su navareni spojevi dobiveni sa Lastek i Thyssen Nautica elektrodom na osnovnom materijalu API 5L X80 čeliku po pitanju tvrdoće pokazali

dobru primjenjivost za mokro podvodno zavarivanje. Udarne radnje loma i savijanje u ovom eksperimentalnom radu nisu ispitane. Rezultati dobiveni ispitavanjem mikrostrukture pokazali su martenzitni pojas uz rub linije staljivanja metala zavora što je uobičajeno kod jednoprolaznog zavarivanja. Potrebno je napomenuti da bi pri višeprolaznom zavarivanju koje je u praksi nužno kod mokrog podvodnog zavarivanja martenzitna struktura bila temperirana te bi bile ostvarene još niže vrijednosti tvrdoće. Dobiveni rezultati u ovom eksperimentalnom radu mogu se primijeniti pri odabiru postupaka i parametara zavarivanja za mokro podvodno zavarivanje API 5L X80 čelika u cilju postizanja tražene kvalitete zavarenih spojeva. Za točnije određivanje prikladnosti API 5L X80 čelika kao osnovnog materijala za mokro podvodno zavarivanje potrebno je detaljnije proučiti utjecaj višeprolaznog zavarivanja na postizanje najpovoljnije mikrostrukture s aspekta dobivene tvrdoće. Mikrostruktura zavarenih spojeva direktno utječe na učestalost pojava hladnih pukotina koje su uvijek prisutna opasnost pri mokrom podvodnom zavarivanju.

6. Literatura

- [1] <http://madmikesamerica.com/2010/06/oil-platforms-in-the-gulf-of-mexico-scream-baby-scream/>; 15.06.2012
- [2] Maintenance and Repair Welding in the Open Sea; Welding Journal; November 2005
- [3] Smojver A.; Podvodno zavarivanje u otežanim uvjetima; Zavarivanje u pomorstvu; Haludovo 1998.
- [4] Kralj S. , Kožuh Z. , Garašić I. ; Stanje i trendovi razvoja podvodnog zavarivanja i nerazornih ispitivanja; časopis Zavarivanje, br. 48, god. 2005.; str. 153-165
- [5] <http://underwater-welding-schools.net/images/144497.jpg>; 15.06.2012
- [6] Napredovanje hiperbaričkog podvodnog zavarivanja do velikih dubina kao rezultat razvoja off shore tehnologije; časopis Zavarivanje, br. 29, god. 1986; str. 287-295
- [7] Fostervoll H. , Aune R. , Berge J. O. , Woodward N. ; Remotely Controlled Hyperbaric Welding of Subsea Pipelines; 6th Pipeline Technology Conference; 2011.
- [8] <http://www.statoil.com/en/technologyinnovation/fielddevelopment/>; datum 16.06.2012
- [9] Undersea Welders Dive 230 Feet to Repair Pipeline; Welding Journal; March 1977; str. 38
- [10] Adrian F. Dier; Assesment of repair techniques for ageing or damaged structures; Novemeber 2004
- [11] David J. Keats; Underwater Wet Welding; A Welder's Mate; TJ International, Padstow, Cornwall, 2011.
- [12] Predavanja sa kolegija Postupci Zavarivanja i Zavarljivost na FSB-u
- [13] Garašić I.; Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju; Doktorski rad; Zagreb 2008.
- [14] Zavarivanje i zavarivanju srodne tehnike; <http://www.pondt.hr/zavarivanjeall.pdf>; 15.06.2012

[15] S. Ibarra; R.L. Reed; J.K. Smith; P.E. O'Connor; C. E. Grubbs; Underwater Wel-Welding Techniques for Repair of Higher-Carbon-Equivalent Steels; 22nd Annual Offshore Technology Conference; Texas; May 7-10, 1990.

[16] S. Kralj, I. Garašić, Z. Kožuh; Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata; FSB Zagreb

[17] I. Garašić; prezentacija za predavanja iz Mokrog podvodnog zavarivanja

[18] Kemijski sastav API 5L X80 čelika prema tehničkoj dokumentaciji iz čeličane Duisburg, Njemačka

[19] <http://www.leecosteel.com/products/en-standards-steel/s235.html>